

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA ÁREA
DE SEMICONDUTORES NA INDÚSTRIA
DE TELHAS DE CONCRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

ANTONIO SÉRGIO BREJÃO

SÃO PAULO
2017

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA ÁREA
DE SEMICONDUTORES NA INDÚSTRIA
DE TELHAS DE CONCRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas de Operação.

Linha de Pesquisa: Redes de Empresas e Planejamento da Produção.

Projeto de Pesquisa: Estratégias para melhoria de competitividade.

ANTONIO SÉRGIO BREJÃO

SÃO PAULO

2017

Brejão, Antonio Sérgio.

Reaproveitamento de resíduos da área de semicondutores na indústria de telhas de concreto / Antonio Sérgio Brejão. - 2017.

151 f. : il. color. + CD-ROM

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2017.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas e Operação.

Orientador: Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto.

1. Silício. 2. Água e lodo residuários. 3. Semicondutores.
4. Construção civil. 5. Telhas de concreto. 6. Co-produto, 7. Simbiose Industrial. I. Vendrametto, Oduvaldo (orientador). II. Título.

ANTONIO SÉRGIO BREJÃO

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA ÁREA
DE SEMICONDUTORES NA INDÚSTRIA
DE TELHAS DE CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

_____/____/____
Prof.^a Dr^a Maria Lúcia Pereira da Silva
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

_____/____/____
Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva
Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC - SP)

_____/____/____
Prof.^a Dr^a Cecília Maria Villas Bôas de Almeida
Universidade Paulista (UNIP)

_____/____/____
Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves
Universidade Paulista (UNIP)

_____/____/____
Orientador: Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto
Universidade Paulista (UNIP)

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a minha esposa que, com ternura e paciência, compreendeu meus objetivos, apoiando-me e incentivando-me do começo ao fim deste estudo.

Ao meu filho Leandro, grande incentivador, que compreendeu as tantas vezes que lhe disse não, pois estive focado neste trabalho.

Aos meus pais Antônio (*In Memoriam*) e Nair, meus alicerces que com educação, orientação e paciência me mostraram o quanto é importante ter uma família unida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor, meu DEUS, Pai e Criador, que pela sua misericórdia me concedeu o dom da vida esperando de mim que eu aja de acordo com seus mandamentos permitindo que eu chegasse ao fim deste estudo com saúde e alegria.

Ao professor e orientador, Dr. Oduvaldo Vendrametto, que com paciência, profissionalismo e dedicação fez-me entender e compreender o quanto é importante o estudo, a pesquisa e a perseverança.

À minha esposa Sílvia e meu filho Leandro, pelo apoio e incentivo durante todo este trajeto.

Aos meus pais, Antônio (*In Memoriam*) e Nair, através dos ensinamentos, prepararam-me para vida e para o caminho correto.

Aos professores/as Dra. Irenilza de Alencar Nääs, Dr. João Gilberto Mendes dos Reis, Dr. José Benedito Sacomano, Dra. Márcia Terra da Silva, Dr. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto e Dr. Rodrigo Franco Gonçalves que, ao longo do curso, enriqueceram meu aprendizado, colaborando com a realização do meu ideal.

À empresa parceira de semicondutores e seus colaboradores pelo apoio e presteza nas informações, contribuindo muito para o meu aprendizado e para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

À indústria de telhas por permitir a confecção e análise dos protótipos, pela confiança e a disponibilidade de seus colaboradores.

À professora Dra. Maria Lúcia Pereira, do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade de São Paulo (USP) pela disponibilidade e pelos ensinamentos.

Ao professor Dr. Davinson Mariano da Silva, do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC), pela confiança e permissão na execução das análises das amostras no referido laboratório e a sua equipe, em especial os professores Abrão Chiaranda Merij e Silvano Leal dos Santos.

À Universidade Paulista – UNIP, aos funcionários do Programa de Pós-Graduação, que com presteza e dedicação sempre estiveram prontos a esclarecerem minhas dúvidas e a atenderem minhas solicitações, em especial a Sra. Márcia Nunes.

Às professoras Dra. Sílvia Pierre Irazusta e Dra. Elizabeth Pelosi Teixeira, do Laboratório de Ecotoxicologia da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC – Sorocaba), pela confiança e permissão na execução das análises biológicas das amostras e a sua equipe, em especial Paulo Balsamo.

Aos meus colegas de classe, em especial o grande amigo Marcos de Oliveira Moraes, pelo apoio e contribuição no meu aprendizado.

Aos demais colegas de classe pelos debates, que enriqueceram muito nossas aulas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares (PROSUP) pela bolsa de estudo recebida durante este trabalho.

A todos que de forma indireta contribuíram para que esta pesquisa pudesse ser realizada e finalizada.

EPÍGRAFE

“Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)

RESUMO

A literatura apresenta estudos sobre os resíduos “água e lodo” do processo de lapidação, polimento das lâminas/*wafer* de silício e corte individualizado dos *chips*, do setor de semicondutores que detêm propriedades para reaproveitamento, na indústria da construção civil. O presente estudo se deu por meio de experimentos empíricos, confecção de protótipo de telhas de concreto como oportunidade de negócios, pelos quais foi possível analisar a possibilidade de reutilização do lodo e da água residuários como co-produtos para artefatos de concreto. Esses resíduos compõem um interessante agregado à massa de concreto devido a determinadas propriedades, verificadas em testes executados em laboratório. Mediante análise do comportamento mecânico e dos testes de resistência dos corpos-de-prova construídos seguindo a mistura para produção de argamassa de concreto, especificamente telhas de concreto, os resultados indicaram que os artefatos compostos por argamassa contendo o co-produto água residuária apresentaram resistência à flexão cerca de 4,8% superior à observada em telhas padrão de mercado. A produção das telhas com o co-produto lodo residuário, os testes de resistência à flexão ficaram em torno de 6,6% abaixo do recomendado pela norma ABNT NBR 13858-2/97. Contudo tais artefatos apresentaram redução da massa podendo implicar em ganhos na estrutura do telhado quanto à redução do carregamento. Outro resultado é que os co-produtos não apresentaram toxicidade quando submetidos a ensaios com *Eisenia andrei*, *Raphidoceles subcapitata* e *Allium cepa*. A proposta sugere a continuidade das pesquisas com o lodo residuário para obtenção da mistura ideal e a formação de parceiros num processo de simbiose industrial entre os setores da construção civil e de semicondutores para a reutilização dos resíduos constituindo uma oportunidade de negócios.

Palavras-chave: Silício. Água e Lodo Residuários. Semicondutores. Construção Civil. Telhas de Concreto. Co-produto. Simbiose Industrial.

ABSTRACT

The literature presents studies that point out that the "water and sludge" residues lapidation, polishing/silicon wafer and subsequently individualized chips, and cutting process in the semiconductor industry have properties for reuse, particularly in the civil construction industry. The present study was carried out through empirical experiments, prototyping of concrete roof tiles and elaboration of a business plan through which it was possible to analyze the possibility of reuse of wastewater and sludge as co-products for concrete artifacts. The waste in question compose an interesting aggregate to the mass of concrete as a business opportunity due to certain properties, verified in tests carried out in laboratory. By analyzing the mechanical behavior and the resistance tests of the specimens constructed following the traces for the production of concrete mortar, specifically concrete tiles, the results indicated that the artifacts composed of mixture containing the wastewater co-product presented flexural strength about 4.8% higher than that observed in standard market tiles. On the other hand, the production of the roof tiles with the waste co-product, the flexural strength tests were around 6.6% below that recommended by ABNT NBR 13858-2/97. However, these artifacts had a reduction in mass and could imply gains in roof structure in terms of load reduction. Another result is that the co-products did not show toxicity when tested with *Eisenia andrei*, *Raphidocoles subcapitata* and *Allium cepa*. The proposal suggests the continuity of research with wastewater to obtain the ideal trait and the formation of partners in a process of industrial symbiosis between the civil construction and semiconductors sectors for the reuse of waste constituting a business opportunity.

Keywords: Silicon. Water and Sludge Residues. Semiconductors. Construction. Concrete roof tiles. Co-product. Industrial Symbiosis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação química do silício metálico.....	34
Tabela 2 – Preço do silício com diferentes graus de pureza	36
Tabela 3 – Importação de semicondutores	42
Tabela 4 – Resistência à ruptura em função da altura do perfil	56
Tabela 5 – Fluxo do processo de produção de telhas de concreto	58
Tabela 6 – Produtos para floculação e precipitação.....	68
Tabela 7 – Materiais utilizados na análise de precipitação	69
Tabela 8 – Materiais para análise da massa de lodo em água	70
Tabela 9 – Materiais utilizados para determinar os elementos químicos do lodo.....	72
Tabela 10 – Determinação dos elementos químicos da água residuária	72
Tabela 11 – Materiais utilizados para os testes com organismos do solo	74
Tabela 12 – Materiais utilizados no teste com Algas.....	77
Tabela 13 – Solução: Água Tamponada (NaHCO_3 a 15 mg.L^{-1})	77
Tabela 14 – Aparelhos utilizados nos testes	77
Tabela 15 – Composição do meio micronutriente (Solução 1).....	78
Tabela 16 – Soluções macronutrientes para meio <i>Algal Assay Procedure medium</i> .	79
Tabela 17 – Materiais utilizados para os testes com <i>Allium cepa</i>	83
Tabela 18 – Materiais utilizados para produção dos corpos-de-prova	86
Tabela 19 – Composição padrão de uma telha em %.....	87
Tabela 20 – Traços de um conjunto de corpo-de-prova para cada lote	88
Tabela 21 – Traços de cada lote de corpos-de-prova	88
Tabela 22 – Materiais e equipamentos utilizados para produção de 32 telhas	91
Tabela 23 – Teste de absorção de água das telhas por 24 horas.....	92
Tabela 24 – Quantidade de partículas de silício na água residuária*.....	95
Tabela 25 – Resultados da análise por ICP em água residuária.....	96
Tabela 26 – Teste de Fluorescência do lodo por Raios-X.....	96
Tabela 27 (a) – Secagem do lodo em estufa	97
Tabela 28 – Teste de compressão por lote	102
Tabela 29 – Determinação do coeficiente de variação dos lotes de corpos-de-prova	105
Tabela 30 – Análise de absorção de água e de massa dos corpos-de-prova.....	108

Tabela 31 – Massa (em kg) das telhas após produção	108
Tabela 32 – Ensaio de flexão - telhas produzidas com lodo residuário (Amostra A)	109
Tabela 33 – Ensaio de flexão - telhas produzidas com água residuária (Amostra B)	110
Tabela 34 – Teste de absorção de água (Telhas)	111
Tabela 35 – Custo do tratamento de efluente	118
Tabela 36 – Projeção econômica para captação de água pela indústria de telha de grande porte	118
Tabela 37 – Custo de destinação do lodo para aterro industrial	119
Tabela 38 – Projeção de ganhos financeiros às indústrias	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das reservas de quartzo no Brasil	33
Figura 2 – Silício Metalúrgico	33
Figura 3 – Percentual dos principais países produtores de (SGM) em 2013	34
Figura 4 – Etapas da produção de (Cl's).....	36
Figura 5 – Diagrama de causa e efeito da produção no setor de eletrônicos	39
Figura 6 – Fluxo de atuação das empresas produtoras de (Cl's).....	40
Figura 7 – Balança comercial de produtos eletroeletrônicos em US\$ bilhões.....	41
Figura 8 – Solicitações de patentes verde no período de 2015.....	54
Figura 9 – Telha de concreto modelo <i>coppo vêneto</i>	55
Figura 10 – Limites do sistema com relação ao ciclo de vida das telhas de concreto	57
Figura 11 – Fluxo sequenciado do processo de produção de telhas de concreto.....	59
Figura 12 – Fluxo dos experimentos	62
Figura 13 – Fluxo do processo de tratamento de efluente interno	66
Figura 14 – Sequência do Processo de Tratamento	67
Figura 15 – Amostra de água residuária contendo silício.....	69
Figura 16 – Análise de precipitação do silício durante cinco dias	69
Figura 17 – Comparação da massa de silício na água residuária com água potável.....	70
Figura 18 – Amostras de água residuária para análise de ICP	73
Figura 19 – Sequência da manipulação com <i>Eisenia andrei</i> - (minhocas).....	76
Figura 20 – Teste de toxicidade crônica com <i>Raphidoceles subcapitata</i> (Algas).....	80
Figura 21 – Transferência do inóculo da alga para as condições de exposição	81
Figura 22 – Contagem de células por microscopia óptica.....	82
Figura 23 – Bioensaio com <i>Allium cepa</i> (cebola)	84
Figura 24 – Lotes dos corpos-de-prova para testes de compressão.....	86
Figura 25 – Materiais utilizados na produção dos corpos-de-prova de concreto	87
Figura 26 – Ensaio de compressão dos corpos-de-prova em lotes.....	89
Figura 27 – Telhas produzidas com os resíduos (água e lodo).....	90
Figura 28 – Separação dos lotes para os ensaios de flexão	93
Figura 29 (A) – Relação do crescimento da população algal em relação ao controle	98
Figura 30 – Representação gráfica referente à EC ₅₀	99

Figura 31 – Partículas de silício após secagem da água residuária.....	101
Figura 32 – Microscopia de argamassa produzida com (a) água e (b) água residuária.....	101
Figura 33 – Resistência à compressão em MPa dos corpos-de-prova	103
Figura 34 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de cada lote com coeficiente de variação (%) associado ao desvio padrão da média das tensões....	106
Figura 35 – Resistência à flexão da telha produzida com água residuária comparada ao lodo	110
Figura 36 – Análise de absorção de água (Telhas de concreto)	111
Figura 37 – Plano de melhoria contínua para a empresa de semicondutores	114
Figura 38 – Análise do ambiente através da Matriz SWOT.....	121

LISTA DE ABREVIATURAS

AAP	<i>Algal Assay Procedure Médium</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAFE	Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
APL	Arranjo Produtivo Local
ARI	Alta Resistência Inicial
CADRI	Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CEITEC	Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada
CENA	Centro de Energia Nuclear na Agricultura
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CI	Circuito Integrado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C.P.	Corpo-de-Prova
CP	Cimento Portland
CV	Coeficiente de Variação
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DI	Deionizada
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
FATEC	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
FCJ	Resistência à compressão do concreto para a idade de “j” dias, em MPa
FCK	Resistência característica do concreto à compressão
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IAC	Índice de Aberrações Cromossômicas
IMN	Índice de micronúcleos
IPC	<i>Association Connecting Eletronics Industries</i>
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i>

IEA	Instituto de Estudos Avançados
IIEP	Intercâmbio, Informações, Estudos e Pesquisas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LPCM	Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Denominação das Normas da (ABNT)
NDA	<i>Non Disclosure Agreement</i>
OBAPL	Observatório Brasileiro de Arranjos Produtivos Locais
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PADIS	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores
PBSI	Programa Brasileiro de Simbiose Industrial
PCI	Placa de Circuito Impresso
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Action</i>
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPCS	Para a Produção e Consumo Sustentável
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RX	Raio-X
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SGM	Silício Grau Metalúrgico
SGS	Silício Grau Solar
SGE	Silício Grau Eletrônico
SAI	<i>Semiconductor Industry Association</i>
Si	Silício
SMT	<i>Surface Mounting Technology</i>
UE	União Européia
USP	Universidade de São Paulo
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WEEE	<i>Waste Electrical & Electronic Equipment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

cm ²	Centímetro Quadrado
CO ₂	Dióxido de Carbono
g	Gramas
°C	Grau Celsius
kg	Quilograma
kgf	Quilograma Força
km	Quilômetro
kN	QuiloNewton
L	Litro
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
mg	Miligramas
mL	Mililitros
MPa	Mega Pascal
N	Newton
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
μL	Microlitro
v/v	Volume/Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Estrutura do trabalho	22
1.2 Justificativa e relevância da pesquisa.....	23
1.3 Caracterização do problema	24
1.4 Objetivos.....	24
1.4.1 Objetivo geral	24
1.4.2 Objetivos específicos	25
2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 A produção industrial e a sustentabilidade	26
2.2 O paradigma da sustentabilidade	29
2.3 Aplicações do silício	31
2.3.1 Aplicação do silício na indústria de semicondutores	35
2.4 Produção de semicondutores	37
2.4.1 Resíduos da produção de semicondutores e análise de toxicidade	43
2.4.2 Aplicação de silício na indústria da construção civil.....	45
2.5 Produção de telhas de concreto	46
2.5.1 Telhas de concreto: produção e agregados	49
2.5.2 Pesquisa de patentes de telhas produzidas com resíduos de silício	53
2.5.3 Características e processo de produção das telhas de concreto	55
3 METODOLOGIA	61
3.1 Aspectos metodológicos	63
3.1.1 Descrição dos resíduos (água e lodo residuários), e dos processos de tratamento de efluente da empresa de semicondutores	64
3.1.2 Análise de precipitação das partículas de silício e da massa de silício presente na água residuária	68
3.1.3 Caracterização das amostras de água e lodo residuário	70
3.1.3.1 Obtenção do percentual de umidade do lodo residuário	71
3.1.3.2 Determinação da composição química do lodo e da água residuária.....	71
3.1.4 Testes ecotoxicológicos com organismos do solo <i>Eisenia andrei</i> - (minhocas)	73

3.1.5 Testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores aquáticos <i>Raphidoceles subcapitata</i> - (algas)	76
3.1.6 Testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores superiores <i>Allium cepa</i> - (cebola).....	82
3.1.7 Ensaios dos corpos-de-prova produzidos com argamassa de concreto para evidenciar a aplicabilidade dos co-produtos na construção civil ..	85
3.1.8 Produção de protótipos telhas de concreto com lodo e água residuária contendo partículas de silício	90
3.1.9 Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com os co-produtos	92
3.1.10 Análise de viabilidade econômica e de oportunidade de negócios entre os setores em estudo	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
4.1 Resultados	94
4.1.1 Descrição dos resíduos (água e lodo) e dos processos de tratamento de efluente da empresa de semicondutores	94
4.1.2 Análise de precipitação das partículas de silício e da massa de silício presente na água residuária.....	94
4.1.3 Caracterização química das amostras de água e lodo residuário.....	95
4.1.4 Obtenção do percentual de umidade do lodo residuário	97
4.1.5 Testes ecotoxicológicos com organismos do solo <i>Eisenia andrei</i> (minhoca)	97
4.1.6 Testes ecotoxicológicos com organismos aquáticos <i>Raphidoceles subcapitata</i> (algas).....	98
4.1.7 Testes ecotoxicológicos com organismos superiores <i>Allium cepa</i> (cebola)	100
4.1.8 Ensaios com corpos-de-prova produzidos com argamassa de concreto para evidenciar a aplicabilidade dos co-produtos na construção civil	100
4.1.9 Aplicação dos resíduos na produção de corpos-de-prova para produção de telhas de concreto	102
4.1.10 Teste de absorção de água dos corpos-de-prova.....	107
4.1.11 Produção de protótipos telhas de concreto com lodo e água residuária contendo partículas de silício	108

4.1.12	Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com lodo residuário	109
4.1.13	Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com água residuária	109
4.1.14	Teste de absorção de água das telhas de concreto.....	111
4.2	Discussões.....	112
4.2.1	Dos ensaios ecotoxicológicos	112
4.2.2	Dos ensaios com os corpos-de-prova	112
4.2.3	Da produção de protótipos e ensaios com telhas de concreto.....	113
4.2.4	Proposta de melhoria contínua para a empresa de semicondutores .	113
4.2.5	Proposta de oportunidade de negócios para o co-produto (água residuária)	114
4.2.6	Proposta de oportunidades de negócio para o co-produto (lodo residuário)	118
4.2.7	Diferencial para a indústria da construção civil	120
4.2.8	Análise de viabilidade técnica, econômica, organizacional e legal	120
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.1	Conclusão	123
5.2	Limitações da pesquisa	125
5.3	Proposta futura	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
APÊNDICE A	- Reaproveitamento de resíduos na composição de artefatos de concreto	141
APÊNDICE B	- Relatório de ensaio químico em água residuária do processo de corte de <i>wafer</i> de silício (ICP)	143
APÊNDICE C	- Relatório de ensaio químico em água descartada em efluente (ICP)	144
APÊNDICE D	- Relatório de ensaio com corpos-de-prova – lote (A)	145
APÊNDICE E	- Relatório de ensaio com corpos-de-prova – lote (B)	146
APÊNDICE F	- Relatório de ensaio com corpos-de-prova – lote (C)	147
APÊNDICE G	- Relatório de ensaio com corpos-de-prova – lote (D).....	148
APÊNDICE H	- Ensaio de ruptura à flexão das telhas de concreto	149

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico do setor eletroeletrônico, em especial o de semicondutores para produção dos circuitos integrados - CI's observa-se o aumento do consumo desses componentes. A consequência desse aumento é a crescente demanda por insumos, em particular, o silício que é a matéria-prima principal para a sua fabricação. Devido o conceito de semicondutor ser abrangente e genérico, incorporando a produção de dispositivos como os CI's, *chips*, memórias entre outros, o foco desta pesquisa dar-se-á em uma indústria de semicondutores específica.

O silício *in natura* é submetido a processos industriais e tratamentos e recomposto em cilindros. Na produção dos circuitos integrados, uma das etapas consiste na lapidação e polimento das lâminas e corte individualizado dos *chips* inseridos nessas lâminas/*wafers*. Nessa etapa, há geração de resíduo composto por pó de silício e água e o tratamento desse efluente resulta no lodo e na água residuários com presença de silício e, neste trabalho, serão denominados de co-produtos¹. Essa denominação indica a possibilidade de um resíduo gerado no final de um processo de produção ser utilizado em outro processo produtivo.

Na produção de semicondutores, partículas de silício que se encontram em meio aquoso, na forma de lodo, apresentam difícil precipitação. A separação e descarte desse resíduo necessitam de operações industriais internas complexas.

Entender as particularidades do silício é fundamental para a proposta deste estudo. Trata-se do elemento químico mais abundante da face da Terra, perfazendo 25,7% do seu peso. Esse elemento químico aparece na argila, feldspato, granito, quartzo e areia, na forma de dióxido de silício, também conhecido como sílica, e silicatos que são compostos contendo silício, oxigênio e metais. O silício é o principal componente do vidro, cimento, cerâmica, da maioria dos componentes semicondutores e dos “silicones”, que são substâncias plásticas muitas vezes confundidas com o silício (QUIMLAB, 2015).

O silício tem sido utilizado na forma de fertilizante em vários países, como Brasil, Japão, Ilhas Maurício, Estados Unidos da América - EUA e, também na Austrália e na África do Sul. O Japão utiliza o silício no cultivo de arroz há seis décadas (RODRIGUES et al., 2011).

¹ Co produto: Final do item produzido como resultado de um processo. Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), 2017.

Embora abundante na natureza, se exposto indevidamente o silício pode apresentar alguns efeitos tóxicos ao homem. Como exemplo, Barbosa et al. (2008) salientam que a silicose, a mais prevalente das pneumoconioses, é provocada pela inalação de partículas de sílica cristalina. Indivíduos expostos à sílica, com ou sem silicose, apresentam risco aumentado de tuberculose e de micobacterioses não-tuberculosas. O risco de silicóticos desenvolverem tuberculose em relação a controles sadios varia de 2,8 a 39 vezes, em conformidade com a gravidade da doença de base.

Os riscos da inalação de poeira com sílica podem estar presentes em uma ampla variedade de situações: extração e beneficiamento de rochas como o granito e pedras em geral, mineração de ouro, arsênico, estanho e de pedras preciosas e perfuração de poços; na indústria cerâmica, de materiais de construção, de borracha, na fabricação de vidro e de fertilizantes (rocha fosfática), em fundições e na produção de talco (comumente contaminado com sílica); operação de jateamento de areia, rebarbação, retífica e polimento de metais e minerais com abrasivos contendo sílica, e em atividades de manutenção e limpeza de fornos, moinhos e filtros; confecção de prótese dentária (FILHO et al., 2006).

Uma das propostas desta pesquisa é investigar uma possível toxicidade dos co-produtos. Por meio de ensaios ecotoxicológicos com organismos do solo (minhoca) – *Eisenia andrei*, com organismos bioindicadores aquáticos (algas) - *Raphidocoeles subcapitata* e com organismos bioindicadores superiores (cebola) - planta *Allium cepa*.

Do ponto de vista ecológico, o descarte desse lodo na natureza, em primeira análise, pode parecer inofensivo, por tratar-se de uma solução aquosa de pó de silício. Contudo, por serem resíduos volumosos (água e lodo), do ponto de vista econômico, o descarte do lodo traz um problema caracterizado pelo não aproveitamento desse resíduo e o espaço físico para depósito. Investigar-se-á o aproveitamento desses resíduos como insumos para a indústria da construção civil, cujo insumo básico para composição de argamassa é o cimento e a areia, que são constituídos de sílica.

O reaproveitamento do lodo e da água residuária como co-produtos na construção civil poderá levar ao saneamento simultâneo de dois problemas ambientais: o descarte do lodo e da água residuária no final da cadeia produtiva da

indústria de semicondutores e a contribuição de insumo para a cadeia produtiva da indústria da construção civil.

Os fatores econômicos, ambientais e de sustentabilidade exigem uma análise setorial da produção de semicondutores e a mensuração dos custos para destinação ambiental correta dos resíduos. O emprego dos resíduos na geração de novos produtos ou melhoria daqueles existentes situa-se no topo das iniciativas a favor da preservação ambiental. Trata-se da produção de artefatos de concreto para a indústria da construção civil. A constituição de um arranjo produtivo local² foi avaliada para possibilitar a proposta de fechamento de ciclo para a reutilização dos resíduos.

A introdução do conceito de sustentabilidade nas empresas é relativamente nova e busca equilibrar lucros com preservação ambiental. Os “negócios sustentáveis” se baseiam em um modelo de gestão que considera o lucro e também as pessoas e o planeta. É o chamado tripé da sustentabilidade ou o “*triple bottom line*” (*People, Planet and Profit*) são eles: o ambiental, o social e o econômico (BRASIL, 2014). É premissa da ecologia industrial³ para que ocorra a formação de parcerias e troca de insumos e/ou formação de ecossistemas industriais⁴ (QUEIROZ et al., 2007).

De todos os conceitos da área ambiental que fazem parte do cotidiano das empresas, a sustentabilidade parece ser concomitantemente o mais utilizado e o menos compreendido. Essa incompreensão provavelmente origina-se do pouco tempo de estabelecimento desse conceito e da existência de mais de uma abordagem acadêmica para sua definição (LIMAD, 2009).

Todas as fases de um processo de tratamento de resíduos precisam ser monitoradas e um método de gestão eficiente e eficaz poderá contribuir para análise geral da proposta desta tese e contribuirá para o planejamento estratégico das empresas objeto de estudo que, por questões de confidencialidade, serão denominadas de empresa parceira de semicondutores e empresas de telhas de

² Arranjos Produtivos Locais (APLs) são aglomerações de empresas, localizadas em um mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa (OBAPL, 2011).

³ Ecologia Industrial propõe, portanto, fechar os ciclos, considerando que o sistema industrial não apenas interage com o ambiente, mas que é parte dele e dele depende (ALMEIDA e GIANNETTI: 2006).

⁴ Ecossistemas industriais podem ser constituídos tanto por critérios de proximidade geográfica como de afinidade entre os processos produtivos. Distritos industriais tradicionais podem ser a base para um ecossistema industrial, tanto quanto as cadeias produtivas (MARINHO et al., 2001).

concreto. As empresas serão caracterizadas para maior entendimento do setor de eletroeletrônicos e o setor industrial de telhas de concreto.

O silício está presente no cimento e na areia e para avaliar a possibilidade de implantação de simbiose industrial⁵ da água e do lodo residuários com silício, da indústria de semicondutores e da indústria de telhas de concreto, experimentos, ensaios em laboratórios, testes de simulação da argamassa e protótipos foram executados e produzidos. Nos resultados e discussão serão propostas opções para os co-produtos como agregado à argamassa de concreto. Essa cocriação propõe a associação industrial e acadêmica como forma de inovação entre as áreas em estudo.

No campo deste estudo, as pesquisas a cerca do reaproveitamento de resíduos da área de semicondutores na indústria de telhas de concreto inserem-se interpretações conceituais da necessidade dos ensaios. Mesmo que de forma empírica pode evidenciar a aplicabilidade de um produto ou processo inovador que contribui para um trabalho de redes de empresas como oportunidade de negócios.

Além dos ensaios e experimentos para se investigar possível toxicidade dos resíduos e influência na resistência da argamassa, uma matriz de oportunidades e de ameaças com abordagem de viabilidade econômica pode indicar estratégias para as empresas objeto deste estudo. Essa matriz também denominada de análise SWOT (*Strengths; Weaknesses; Opportunities e Threats*) proposta por Kotler (2000), avaliará as forças; fraquezas; oportunidades e ameaças ao negócio.

Ao longo desta pesquisa consideram-se estudos referentes à utilização de resíduos como material agregado para artefatos destinados à construção civil. Após pesquisa bibliográfica, não se observaram evidências de práticas de reuso dos resíduos em questão para a produção de telhas de concreto já concebidas e em fase de implementação.

1.1 Estrutura do trabalho

Esta tese contempla o estudo para reaproveitamento de resíduos (água e lodo residuários contendo silício) gerados pela indústria de semicondutores na

⁵ Simbiose Industrial é a troca física de recursos - materiais, serviços, conhecimento, energia e/ou subprodutos (materiais não utilizados por uma empresa podem se tornar materiais de valor para outras), (redução de custo e ganhos ambientais), (facilita a colaboração na utilização de ativos), (logística reversa e troca de capacidade técnica entre as empresas) (PBSI, 2012).

produção de artefatos de concreto para a construção civil, em especial, telhas de concreto. Está dividida em cinco capítulos da seguinte forma:

No Capítulo 1 é contextualizada a introdução à tese, a justificativa e relevância da pesquisa, a caracterização do problema, os objetivos e a estrutura geral.

O Capítulo 2 é composto pela pesquisa bibliográfica e o estado da arte a respeito da caracterização do silício como semicondutor, aplicações e produção do silício na indústria de semicondutores, aplicação do silício na indústria da construção civil, tipos de cimento utilizados na construção civil, aplicação dos resíduos como agregados para concreto, setor de telhas e características do processo de produção de telhas de concreto.

No Capítulo 3 é desenvolvida toda a metodologia da pesquisa com a proposição alicerçada no empirismo e no desenvolvimento experimental com a produção de protótipos.

O Capítulo 4 é composto pelos resultados e discussões que seguem a sequência disposta na metodologia para evidenciar a oportunidade de negócios entre a indústria parceira de semicondutores e a indústria de telhas de concreto.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, a conclusão, a análise de viabilidade econômica e de oportunidade de negócio, as limitações da pesquisa e propostas futuras.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

A proposta desta tese é demonstrar a viabilidade de reaproveitamento dos resíduos gerados no final do processo de lapidação, polimento das lâminas/*wafer* de silício e corte individualizado dos *chips* contido nas lâminas e a possibilidade de sua aplicação na composição de material para uso no setor da construção civil, especificamente telhas de concreto. A execução dessa proposta poderá induzir a arranjo tipo simbiose industrial entre a empresa de semicondutores e de telhas de concreto.

A opção pela indústria de telha de concreto se deve ao fato que na região, próxima a empresa parceira de semicondutores estarem localizadas indústrias de telhas de concreto que proporcionam geograficamente oportunidade para a simbiose industrial.

De acordo com Fernandes (2012), estima-se que no Brasil há 200 fábricas de telhas de concreto com produção aproximada de 1.000.000 de telhas/dia.

Com o crescimento do setor de semicondutores, evidencia-se a potencialidade do reaproveitamento de resíduos da fabricação de semicondutores pelas atividades industriais da construção civil, caracterizando-se um novo ramo de interação e de cooperação técnica.

1.3 Caracterização do problema

No contexto produtivo/ambiental, as empresas necessitam atender a um conjunto de normas externas e procedimentos internos para minimizar o impacto ambiental dos resíduos por elas gerados ao longo e ao final de seus processos produtivos.

Se houver possibilidade de transformar os resíduos de final de processos em insumos ou, como definido aqui, co-produtos para outros setores produtivos, a empresa parceira geradora contribuirá com a interação entre sustentabilidade e produtividade, sem prejuízo dos compromissos legais.

A destinação correta dos resíduos passará a ter outra aplicabilidade dentro do contexto empresarial, gerando produto inovador e absorvedor de resíduos, em consonância com as políticas ambientais.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Reaproveitar os co-produtos (água residuária e lodo contendo silício) provenientes da indústria de semicondutores como matéria-prima para a indústria da construção civil, especificamente na produção de telhas de concreto com análise de viabilidade técnica e econômica. Os resíduos são gerados na fase de lapidação, polimento das lâminas de *wafer* de silício e corte individualizado dos *chips*, fase em que se utiliza grande volume de água e em decorrência desses processos, produzindo grande quantidade de pó de silício que misturado à água residuária produz o lodo quando ocorre o tratamento. O propósito da pesquisa é a utilização do lodo e da água residuária para a fabricação de material para a construção civil.

Atualmente o lodo é descartado em locais especiais, que demandam transporte e espaço físico e parte da água residuária é reaproveitada no processo industrial e a outra parte descartada em efluente.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar os resíduos ou co-produtos de silício e dos processos de corte de *wafers* para produção de CI's e seu tratamento na empresa parceira.
2. Reaproveitar água e silício para produção de telhas de concreto e criar protótipo do produto telha de concreto com adição de lodo e de água residuária decorrentes do processo de lapidação, polimento e corte das *wafers*.
3. Avaliar propriedades físicas, químicas e toxicológicas dos co-produtos para sua viabilização técnica, econômica e ambiental.
4. No aspecto técnico, realizar ensaios de resistência mecânica com protótipos de telhas.
5. No contexto econômico, estabelecer projeções financeiras que serão adotadas para análise de oportunidade de negócios e de melhoria contínua entre as empresas de semicondutores e a de telhas de concreto.
6. No aspecto ambiental, possibilitar a criação de arranjo produtivo local e de simbiose industrial entre as empresas em estudo.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 A produção industrial e a sustentabilidade

O esgotamento dos materiais naturais destinados à produção, o excesso de resíduos gerados nos processos de fabricação e serviços aliados ao volume de descartes de produtos obsoletos acenderam um sinal de alerta diante das possibilidades de desastres irreversíveis. Citam-se, entre muitos, o efeito estufa com elevação de temperatura e doenças respiratórias, desertificação em áreas de densa produção agrícola, elevação do nível dos oceanos, comprometimento do volume de água potável. Por meio de investigações científicas, formação de organizações em defesa do meio ambiente e políticas adotadas em muitos países, os sistemas de produção paulatinamente estão mudando suas concepções de produtos e de processos.

O termo sustentabilidade começou a ganhar conotação empresarial a partir da Conferência Rio-92 sobre o meio ambiente do planeta: desenvolvimento sustentável dos países e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em junho de 1992, no Rio de Janeiro, marcou a forma como a humanidade encara sua relação com o planeta. Foi nesse momento que a comunidade política internacional admitiu que era preciso conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a utilização dos recursos da natureza (BRASIL, 1992). O mesmo movimento ocorre no que diz respeito à sustentabilidade. A incorporação dos discursos sobre sustentabilidade vem crescendo ao longo dos anos, após a ECO-92, trazendo os elementos necessários para o engajamento efetivo dos governos, das empresas e da sociedade civil em busca do desenvolvimento sustentável (PEREIRA et al., 2013).

Novos métodos de transformação tornaram-se paradigmas para melhorar os sistemas de produção no contexto da gestão ambiental. O conceito discutido pela academia é o da ecoeficiência surgido como estratégia corporativa para as questões da gestão ambiental empresarial. Passaram-se a orientar políticas públicas de desenvolvimento pressupondo a sustentabilidade ambiental. Pesquisas científicas sobre a sustentabilidade deram suporte ao conceito de ecologia industrial. A ecoeficiência foi criada pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*World Business Council for Sustainable Development*) - WBCSD em

1992 e definida como a entrega de produtos e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida a preços competitivos, reduzindo o impacto ecológico e a intensidade de recursos ao longo do ciclo de vida, em um nível de conformidade com a capacidade de carga estimada da Terra (UNEP, 2016).

Há uma preocupação das empresas no que tange a um ecossistema interno que atenda as normas e legislações sem perder a competitividade empresarial e algumas fortalecem essa questão ambiental como diferencial. A Ecologia Industrial propõe fechar os ciclos, considerando que o sistema industrial não apenas interage com o ambiente, mas é parte dele e dele depende (ALMEIDA; GIANNETTI, 2006).

O reuso de resíduos pode diminuir o impacto ambiental no planeta. As organizações estão atentas ao plano de ação “Para a Produção e Consumo Sustentável” – PPCS em relação à sensibilização e implantação de sistema de gestão ambiental na rede de suprimentos, considerando a possibilidade de promover mudanças ecológicas incrementais em produtos existentes e/ou desenvolvimento de produtos ecológicos, implantação da logística reversa para realizar a gestão de resíduos sólidos e desenvolvimento de propostas para formação de ecologia industrial (NETO et al., 2015).

No ecossistema industrial, o consumo de energia e materiais é otimizado e os efluentes e resíduos de um processo produtivo servem como matéria-prima para outros processos (COSTA et al., 2012).

A criação e o fomento de redes de empresas, que se preocupam com as questões ambientais e para onde seus resíduos de fim de processo são transferidos, podem trazer ganhos ambientais ao planeta.

A formação de redes de empresas ou até mesmo de parceiros comerciais pode viabilizar arranjos locais e a adoção de produção mais limpa para o tratamento adequado dos resíduos gerados ao longo do processo produtivo, promovendo a simbiose industrial entre as empresas. De acordo com Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável - CEBDS, produção mais limpa é a aplicação contínua de uma estratégia ambiental de prevenção da poluição na empresa, focando os produtos e processos, para otimizar o emprego de matérias-primas, de modo a não gerar ou minimizar a geração de resíduos, reduzindo os riscos ambientais para os seres vivos e trazendo benefícios econômicos para a empresa (CEBDS, 2003).

A produção mais limpa incorpora muitos dos princípios da produção enxuta e expande com o aumento dos relacionamentos a ideia de rede (REIS et al., 2015).

Em alguns setores produtivos há um expressivo consumo de recursos naturais e produzir mais com menos recursos ainda é uma tarefa difícil e complexa para as organizações.

Esse ciclo é denominado ecologia industrial, cujo objetivo é formar redes de processos industriais mais elegantes e com menos desperdício (ALMEIDA; GIANNETTI, 2006).

Para o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS, na fase de produção da construção civil, a indústria de materiais consome aproximadamente 50% dos recursos naturais extraídos. Em consequência, o setor é obrigado a utilizar somente materiais abundantes e de baixo custo. Assim, é improvável que venham a surgir materiais radicalmente diferentes dos que são utilizados hoje, baseados em silício, alumínio, ferro e cálcio, elementos químicos mais abundantes no planeta. Dada à demanda, que deve crescer nos próximos anos, nenhum dos materiais principais utilizados poderá ser substituído. Diferente de outros setores, na área de materiais de construção, a mitigação do impacto ambiental vai depender da otimização dos produtos existentes. Basear a construção sustentável na substituição de um material pelo outro pode reduzir o impacto ambiental de uma obra em particular, mas dificilmente reduz o impacto global do setor (CBCS, 2014).

Como exemplo, pode-se citar o reuso de resíduos na construção civil. De acordo com Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, resolução 307/2002, resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica entre outros (CONAMA, 2002).

A adoção de estratégias de sustentabilidade para a diminuição e gestão dos resíduos deve ser elaborada através de indicadores ambientais com abrangência desde a quantidade e forma de descarte, até se possível, a reutilização dos resíduos por outros processos internos da empresa ou por outros setores industriais, demonstrando a efetividade de uma empresa sustentável.

Com a normatização, indicadores de controle tornam-se comuns e auxiliam os gestores no planejamento do uso dos recursos de modo mais sustentável. Para uma melhor compreensão desse fluxo, é necessário incorporar como é o processo de

produção mais limpa e como se dá a ecoeficiência nesse processo de simbiose industrial (LIMAD, 2010).

2.2 O paradigma da sustentabilidade

O termo sustentabilidade surge num processo de estruturação com novidades e incorpora de outros grandes movimentos da produção, produção em massa, produção enxuta (*lean production*) filosofias, técnicas, conceitos, com nome de produção mais limpa como sendo um novo paradigma. As empresas direcionam estratégias de redes com adoção de novos processos e indicadores para reduzir a geração de resíduos.

No âmbito dessa pesquisa, entende-se para esses processos, como bases para a sustentabilidade, verificar que o mesmo não se restringe a um uso mais sábio dos recursos naturais; de uma produção limpa, que evita desperdícios; de um controle dos efluentes de produção; e de uma conservação do meio ambiente, mas também inclui outras dimensões além dessas de eficiência ecológica e ambiental (COSTA et al., 2013).

As teorias associadas ao planejamento estratégico são talvez as mais fecundas quando o assunto é desenvolvimento de indicadores. Ressaltando aqui os indicadores ambientais. Dada à importância de se medir a execução dos planos estratégicos definidos, a evolução natural dos conceitos de indicadores se deu associada a componentes estratégicos, não descaracterizando o uso dos conceitos desenvolvidos em outras áreas da gestão, como controle da qualidade, governança corporativa e gestão por processos (PAVANI; SCUCUGLIA, 2011).

Cada empresa mapeia e gerencia seus processos de produção conforme normas e procedimentos internos e externos. No contexto produtivo, os processos devem ser aplicados de maneira que gerenciem todas as fases de produção propondo sua melhoria contínua ao longo das etapas. Para as questões ambientais, o mapeamento do fluxo dos resíduos também é de extrema importância, pois o gerador do resíduo tem a responsabilidade compartilhada até a destinação correta e efetiva dos rejeitos.

Como exemplo, pode-se acrescentar a otimização da produção; indicadores de gestão da produção; diminuição dos resíduos gerados ao longo do processo de produção; maior controle de qualidade por modelagem de processo e mitigação dos impactos ambientais internos e externos à empresa.

A identificação e modelagem dos processos de negócio são tipicamente utilizadas na implementação de práticas de reengenharia de processos e implantação de sistemas de informação nas empresas. Essas práticas causam forte impacto sobre os processos da organização como um todo e podem, muitas vezes, conduzir a um ganho significativo ou em total fracasso ou mesmo falência da organização (GONÇALVES et al., 2005).

A gestão de indicadores ambientais e a qualidade dos processos devem ser monitoradas desde a entrada de insumos num processo de melhoria contínua, passando pelo processo de produção até a gestão do descarte/destinação dos resíduos gerados ao longo do processo produtivo.

O conceito de melhoramento contínuo implica literalmente em um processo sem fim, questionando repetidamente e requestionando os trabalhos detalhados de uma operação. Para corroborar neste processo, o PDCA⁶ “*Plan, Do, Check, Action*” é a sequência de atividades que são percorridas de maneira cíclica para melhorar as atividades (SLACK et al., 1999).

Para esta tese, a análise do PDCA contribui para a possibilidade de reuso dos resíduos como co-produtos e a possibilidade de simbiose industrial entre a indústria de semicondutores e a da construção civil.

O objetivo principal de uma empresa é, sem dúvida, maximizar o retorno sobre o capital investido (DIAS, 2011). Porém, as empresas também se preocupam com as questões ambientais, já que a noção de que recursos são finitos e cada vez mais escassos é assumida pelas mesmas.

Nenhuma operação produtiva ou parte dela existe isoladamente, todas as operações fazem parte de uma rede maior, interconectadas com outras operações (SLACK et al., 1999).

Para um processo produtivo mais eficiente, parcerias entre as empresas de semicondutores e outras empresas, incluindo as do setor da construção civil, poderão viabilizar arranjos produtivos locais, o que representará ganhos econômicos, ambientais e de operações às mesmas.

Planejar estrategicamente novos meios de gestão dos resíduos pode tornar as empresas mais competitivas e o planejamento estratégico é um esforço para

⁶ PDCA é uma série sistemática de etapas para ganhar conhecimento valioso e conhecimento para a melhoria contínua de um produto ou processo. Também conhecido como Deming Wheel, ou Deming Cycle, o conceito e aplicação foi apresentado pela primeira vez ao Dr. Deming pelo seu mentor, Walter Shewhart. Fonte: <https://deming.org/management-system/pdsacycle>

produzir decisões que orientarão as ações da organização. Esse planejamento deve ser simples e claro, e conter a missão, os princípios, as metas e os objetivos da empresa, baseando-se nas premissas e variáveis internas e externas (BERTAGLIA, 2009).

Essas premissas podem estar relacionadas à necessidade de análise mais abrangente quanto à armazenagem e transporte dos resíduos. Variáveis como volume e tratamento dos resíduos podem implicar em custos adicionais de controle, tratamento e destinação dos resíduos.

Considerando os aspectos de transporte, armazenagem e descarte, uma das ações estratégicas é a análise do fluxo de operações e logística das empresas em estudo com a indicação e mensuração de dados, propondo-se uma decisão mais assertiva na gestão dos resíduos para reutilização. A estratégia pode estar condicionada à destinação dos resíduos diretamente às empresas que farão uso dos co-produtos e assim, reduzir os custos de operações e logística.

A logística empresarial trata de todas as atividades de movimentação e armazenagem, facilitando o fluxo de produtos desde o ponto de aquisição da matéria-prima até o ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento, com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a um custo razoável (BALLOU, 2007). Neste caso, a logística deve ser analisada até o ponto de descarte, haja vista que essa atividade depende de outras empresas para ser executada e concluir a operação.

Ressalta-se a preocupação com o fechamento dos ciclos de produção, podendo ser obtidos pela formação de um ecossistema industrial, em que o consumo de materiais é otimizado e os efluentes e resíduos de um processo podem servir como matéria-prima para outros processos industriais internos e externos.

Para o setor de semicondutores é expressivo o consumo de água na cadeia de produção, sendo a água residuária e o lodo resultante do processo de tratamento caracterizado nesta pesquisa como co-produtos, ou seja, insumos com potencial para aplicação em simbiose industrial.

2.3 Aplicações do silício

O silício é o principal componente do vidro, cimento, cerâmica e da maioria dos componentes semicondutores. Apresenta-se na forma amorfa e cristalina; o

primeiro na forma de um pó pardo mais reativo que a variante cristalina, apresentando-se na forma octaédrica de coloração azul grisáceo e brilho metálico. É proveniente do mineral quartzo e suas minas estão quase que exclusivamente localizadas no Brasil e, em quantidades menores, em Madagascar, Namíbia, China, África do Sul, Canadá e Venezuela. É um elemento metaloide, de símbolo Si, número atômico 14. Metaloides são substâncias simples, condutores de calor e de eletricidade. Caracterizam-se como semicondutores, que na eletrólise⁷ se dirigem para o polo positivo. Os semicondutores são compostos por materiais específicos e similares aos das cerâmicas. Apresentam condutividade entre a dos metais e a dos isolantes; sua condutividade pode ser moldada pela adição localizada de quantidade ínfima de impurezas, permitindo a fabricação dos dispositivos e circuitos integrados. O semicondutor silício também apresenta propriedades mecânicas excelentes, tornando-o utilizável em dispositivos micromecânicos. O silício é utilizado para a produção de ligas metálicas, na preparação de silicones, na indústria cerâmica e, por ser um material semicondutor muito abundante, tem um interesse muito especial na indústria eletroeletrônica e microeletrônica, como material básico para a produção de ligas metálicas e transistores para *chips*, células solares e em diversas variedades de circuitos eletrônicos. O dióxido de silício, areia e argila são importantes constituintes do concreto armado e azulejos, sendo empregados na produção do cimento Portland (SWART, 2008; FARIAS, 2013; QUIMLAB, 2015).

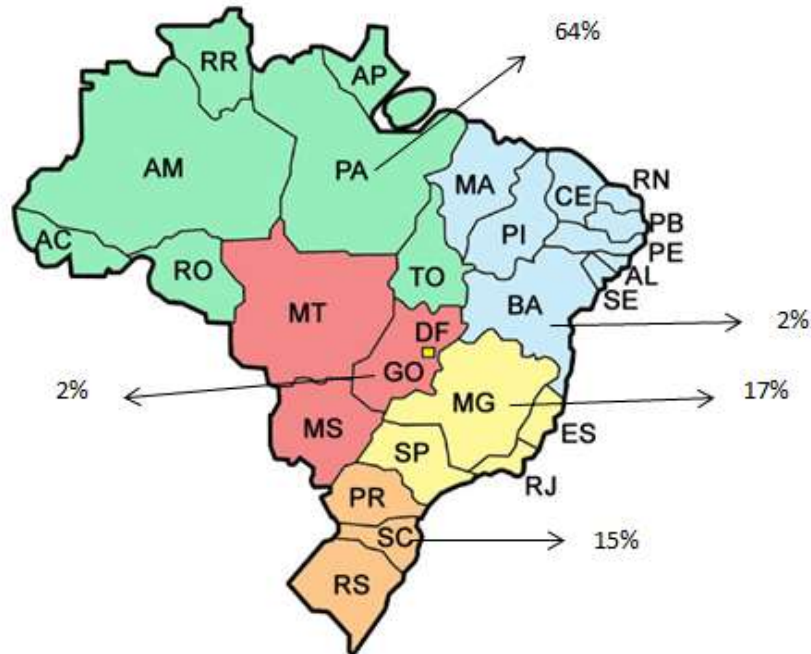
O Brasil é o único produtor de blocos de quartzo natural com propriedades piezoelétricas. É utilizado na produção de ligas contendo silício para a indústria metalúrgica e para uma pequena produção de silício metálico. Trata-se de um cristal que, quando submetido a pressão, gera um campo elétrico em um eixo transversal àquele em que foi aplicada a pressão, podendo ser coletado como tensão elétrica. O silício metálico é empregado na produção de silício de altíssima pureza, por via química ou por via metalúrgica, para componentes eletrônicos usados em campos de tecnologia avançada como a computação, a comunicação espacial, os sistemas de defesa, em painéis fotovoltaicos (FARIAS, 2013; MINASLIGAS, 2015).

O Brasil é detentor de 95% das reservas mundiais de quartzo, o equivalente a 78 milhões de toneladas. No estado do Pará estão as maiores reservas medidas do país, cerca de 64% das jazidas, seguidas de 17% em Minas Gerais, 15% em Santa

⁷ Eletrólise é o conjunto de fenômenos químicos ocorrentes numa solução condutora, provocados pela passagem de corrente elétrica (Dicionário da Língua Portuguesa).

Catarina, 2% na Bahia e 2% em Goiás (ROCHA, 2014). Na Figura 1 é representada a distribuição das reservas de quartzo no Brasil.

Figura 1 – Distribuição das reservas de quartzo no Brasil



Fonte: Adaptado de Orçamento Federal (2017).

No entanto, a vantagem comparativa do Brasil possuir grandes reservas de quartzo é apenas parcialmente aproveitada, pois o país não dominou ainda o ciclo de capacitação tecnológica para manufaturar os produtos nas qualidades e purezas desejadas. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de silício metalúrgico (Figura 2), mas importa todo o silício de grau eletrônico que consome. Produz-se monocristal de silício, mas a partir da importação de silício grau eletrônico (LUZ et al., 2000).

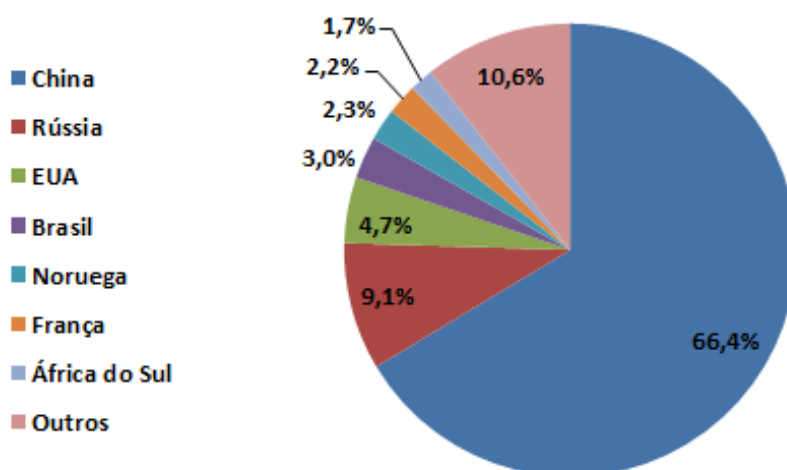
Figura 2 – Silício Metalúrgico



Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Na Figura 3, observa-se a participação em percentual dos principais países produtores na produção mundial de silício grau metalúrgico – SGM, dados de 2013.

Figura 3 – Percentual dos principais países produtores de (SGM) em 2013



Fonte: Adaptado de Carvalho (2014) apud *United States Geological Survey* (USGS) (2014).

Na Tabela 1 é apresentada a especificação dos elementos químicos que compõem o silício metálico nas categorias *standard*, grau químico, grau eletrônico e de alta pureza.

Tabela 1 – Especificação química do silício metálico

Elementos	Standard	Grau Químico	Grau Eletrônico	Alta Pureza
% Si (mín.)	98,5	98,5	98,5	99
% Fe (máx.)	0,5	0,4	0,5	0,2
% Al (máx.)	0,5	0,25	0,3	0,02
% Ca (máx.)	0,3	0,03	0,03	0,03

Fonte: Adaptado de Minasliga (2015).

De acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico - ABRAFE, dados de 2015 apontam que o setor de ferroligas e de silício metálico brasileiro é globalizado e atende às mais exigentes normas de renomados institutos internacionais de auditoria e controle de qualidade e suas exportações equivalem a 65% das suas vendas totais. Além disso, esse setor destaca-se como o sexto segmento mais superavitário no período de 2011 a 2015, representando 7% da balança comercial, com exportações que totalizam

aproximadamente US\$⁸ 1,48 bilhão/ano. Como atende ao mercado interno com seus produtos, evita importações da ordem US\$ 707,9 milhões/ano, reduz o custo de logística e aumenta a competitividade da metalurgia e siderurgia brasileiras.

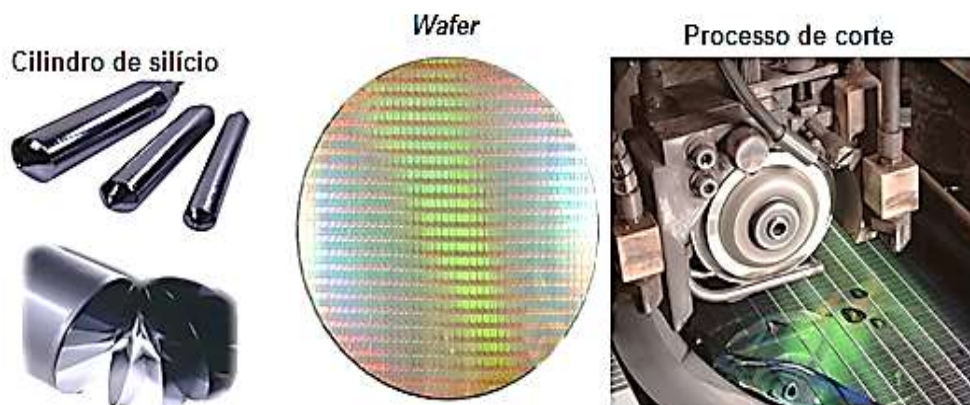
2.3.1 Aplicação do silício na indústria de semicondutores

O material inicial para fabricação dos modernos circuitos integrados é o silício com alto grau de pureza. O material é crescido como um cristal na forma de tarugo. Ele toma a forma de um cilindro sólido de 100 a 300 milímetros de diâmetro por 1000 milímetros de comprimento e sua cor é cinza-metálica. Esse cristal é cortado para que sejam produzidas lâminas de 100 a 300 milímetros de diâmetro com espessura de 400 a 600 microns (SEDRA; SMITH, 2000).

Durante esse processo, muitas lâminas são descartadas, pois qualquer imperfeição na superfície da *wafer*, como partícula de poeira, ou anomalias durante o processo de litografia acabam resultando numa área defeituosa. Como não é possível produzir uma *wafer* de silício quadrada, têm-se também os processadores "incompletos", que ocupam as bordas da *wafer* e também são descartadas no final do processo. Na Figura 4 é possível verificar a sequência do processo de produção com a indicação dos cilindros de silício, as *wafers* e o processo de corte. O silício para a fabricação das *wafers* encontra-se na natureza sob a forma de areia, ou no quartzo, e a primeira fase do processo consiste numa operação de refinamento. O silício é aquecido até 1700°C para eliminar as impurezas por reação gasosa. O material resultante é silício puro com uma estrutura policristalina e necessita de uma uniformidade na sua orientação atômica. O método mais usado para o crescimento do lingote de silício é o método de "Czochralski", em que o silício puro é colocado num cadinho de quartzo e aquecido até ao seu ponto de fusão. Em seguida, é introduzido um cristal de silício no silício fundido no cadinho, e por rotação dá-se o crescimento do lingote. Esse método é o processo para a obtenção de sólidos monocristalinos. É o método mais comum para a produção de *wafers* de semicondutores de grande diâmetro, por exemplo, *wafers* de 300 milímetros (SEDRA; SMITH, 2000; MORIMOTO, 2007; IIEP, 2010; MAIA, 2013).

⁸ Para efeito de padronização monetária, os valores atribuídos em Reais foram convertidos para Dólares Americanos via fator de câmbio US\$ 1,00 = R\$ 3,1078 de acordo com cotação do câmbio de 18/03/2017 - Fonte: Banco Central do Brasil.

Figura 4 – Etapas da produção de (CI's)



Fonte: Adaptado de Morimoto (2007).

Para o silício, utilizam-se três graus de pureza: Silício Grau Metalúrgico - SGM, Silício Grau Solar - SGS e Silício Grau Eletrônico - SGE, sendo: o Silício Grau Metalúrgico possui grau de pureza de 98 a 99,9% e sua principal aplicação é na utilização de fabricação de transformadores; o SGS possui grau de pureza de 99,9999%, utilizado exclusivamente na fabricação de células fotovoltaicas; o SGE possui grau de pureza 99,99999999%, tendo como aplicação a fabricação de componentes eletrônicos semicondutores (FARIAS, 2013).

Na Tabela 2 é apresentada a escala de pureza em massa do silício e os valores de comercialização em US\$/kg.

Tabela 2 – Preço do silício com diferentes graus de pureza

Tipo de Silício	Pureza (% em massa)	Preço aproximado (US\$/kg)
Metalúrgico	98 a 99	1
Metalúrgico melhorado	99 a 99,99	2
Eletrônico multicristal	Acima de 99,9999	100
Eletrônico monocristal	Acima de 99,9999	500
Lâmina	Acima de 99,9999	1000 a 4000

Fonte: Adaptado de MEI (2008).

Segundo Mei (2013), a produção mundial de silício grau eletrônico no ano de 2011 foi de 200.000 toneladas. A indústria de componentes eletrônicos é de atuação mundial por excelência, requer uma economia de escala, é intensiva em capital e necessita mão-de-obra altamente qualificada. Seus altos e contínuos investimentos em pesquisa e desenvolvimento é que vão assegurar-lhe a necessária evolução tecnológica e consequente manutenção no mercado (ABDI, 2011).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, até aproximadamente o final da década de 90, o Silício Grau Solar era obtido como subproduto gerado durante a produção do Silício de Grau Eletrônico, caracterizado pela altíssima pureza e empregado na produção de circuitos integrados. Existem duas rotas para a obtenção do silício:

- Rota para a obtenção do SGE, denominada de rota química, com pesquisas para tornar o processo menos custoso para a produção do SGS.
- Rota metalúrgica, que permite obter o SGS a um menor custo, diretamente a partir do silício de grau metalúrgico, que é um silício de elevado nível de impurezas, aplicado principalmente na produção de ligas de alumínio.

2.4 Produção de semicondutores

Para entender o processo de evolução dos semicondutores, os primeiros transistores surgidos após sua invenção, em 1947, foram fabricados com o semicondutor de germânio que não era apropriado por ser menos eficiente para fabricação de dispositivos e circuitos integrados (TIGRE, 2006; SWART, 2008).

As propriedades físico-químicas do silício e sua abundância na natureza tornam o material semicondutor básico e mais empregado na indústria de eletroeletrônicos. O silício ocorre na forma de areia e é importante ressaltar que a areia de praia não é adequada para fabricação de lâminas de silício. Embora o germânio e o arseneto de gálio sejam também usados na produção de semicondutores integrados, o silício é ainda o material mais popular (SEDRA; SMITH, 2000).

Detentor das maiores reservas mundiais de quartzo, mineral utilizado para fabricação do silício, o Brasil importa as lâminas utilizadas na fabricação dos painéis fotovoltaicos. O país exporta o silício metalúrgico a US\$ 2 o quilo. Depois de purificado no exterior é transformado em lâminas usadas na fabricação de semicondutores ou células fotovoltaicas que custam entre US\$ 50 e US\$ 1000, dependendo da pureza e da cristalinidade (MEI, 2012; FAPESP, 2012).

O avanço tecnológico e a descoberta de novos materiais proporcionaram à indústria da eletrônica diferentes opções para atender a exigência crescente de

velocidade de processamento na computação e os semicondutores cada vez menores e com grande capacidade de armazenamento e de processamento de informações estão sendo desenvolvidos para os setores de comunicação, computação e eletroeletrônicos.

No setor de semicondutores, a competitividade demanda pesquisas, planejamento e o desenvolvimento em novos processos e controles internos.

Dentre as principais formas de colaboração empregadas estão a colaboração em pesquisa e desenvolvimento - P&D e aspectos gerenciais, cocriação a montante e a jusante na cadeia produtiva, financiamento de P&D e aquisição de tecnologia. A partir da evidenciação dos atores e das práticas colaborativas, foi possível criar uma matriz correlacionando os mesmos, fazendo emergir da análise uma quantidade expressiva de contribuições advindas da relação colaborativa por tipo de parceiro (FACCIN et al., 2014).

O setor de eletroeletrônicos foi resumidamente descrito através de um diagrama de causa e efeito, como apresentado na Figura 5 em que se observam a importância do silício e água no início do processo de produção (representado na linha horizontal do fluxo). Observa-se também que o descarte deve privilegiar se possível, a reciclagem (representado nas linhas verticais ao fluxo de produção) próxima ao ponto de produção, ou mesmo internamente à produção (representado nas flechas internas às áreas de produção), por exemplo, placa de circuito impresso - PCI e *surface mounting technology* - SMT que é a tecnologia de montagem na superfície da placa (ARBUCIAS, 2002; QUEIROZ, 2006).

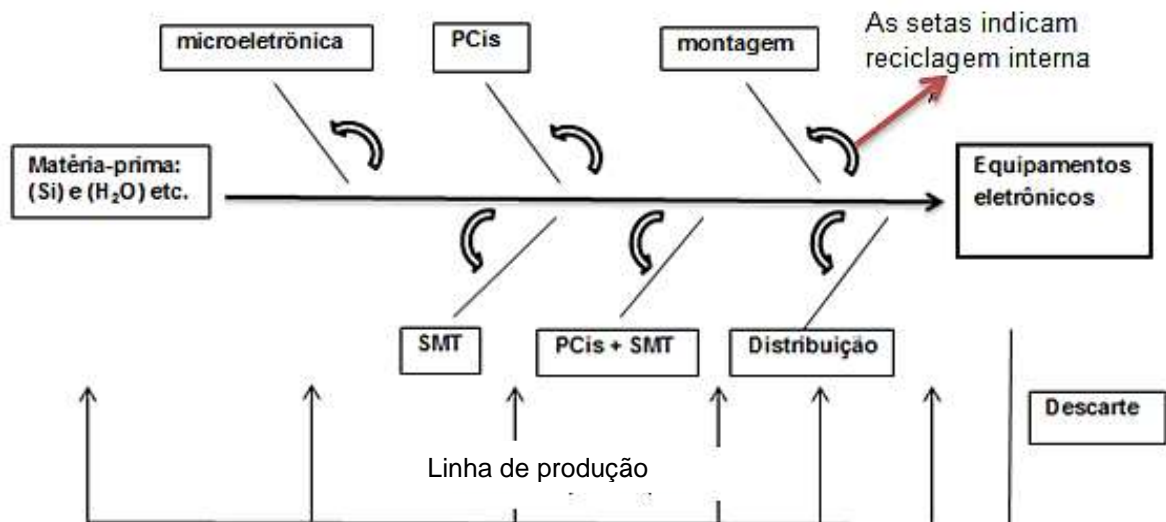
O diagrama de causa e efeito é um método efetivo para ajudar a pesquisar as raízes de problemas levantando as questões: o que, onde, como e por que anteriores (SLACK et al., 1999). Observa-se no diagrama que a água é importante no processo de produção e a indústria de semicondutores utiliza em seu processo de produção água extremamente pura, isenta de íons⁹, denominada tecnicamente de água deionizada.

O setor de eletrônicos foi avaliado preliminarmente e apresentou, devido ao alto valor agregado de seus produtos, várias oportunidades de redução de custos, de melhoria ambiental e social na cadeia produtiva devido à reutilização de co-produtos gerados internamente ou por outras empresas, sugerindo um esforço para

⁹ Íons são átomos que perderam ou ganharam elétrons em razão de reações, e se classificam em ânions e cátions: Ânions são íons negativos; e Cátions são íons positivos (SOUZA, 2016).

aumentar a formação de ecossistemas industriais nesse setor (QUEIROZ et al., 2007).

Figura 5 – Diagrama de causa e efeito da produção no setor de eletrônicos



Legenda: (PCI - Placa de Circuito Impresso); (SMT - *surface mounting technology*)

Fonte: Adaptado de Queiroz (2006).

O cenário da produção de semicondutores no Brasil e no mercado internacional, e novos modelos de produção e diretrizes de incentivo vêm tornando as indústrias desse setor mais especializadas e competitivas.

Do silício grau metalúrgico se obtém o silício grau eletrônico, material de extrema pureza que, em sua forma monocristalina, se constitui a base da microeletrônica, para a fabricação de dispositivos semicondutores, utilizados em circuitos integrados, transistores, diodos entre outros (MORI, et al., 2007).

Com o incremento das tecnologias, estudos demonstram que o silício enriquecido atinge 99,99999% de pureza ideal para semicondutores e os testes em laboratório demonstraram a possibilidade de produção de silício enriquecido denominado silício quântico (DWYER et al., 2014).

Nesta dinâmica evidencia-se que a nanotecnologia é parte integrante dos processos produtivos de semicondutores na microeletrônica. Pesquisas com materiais alternativos estão em desenvolvimento como a aplicação do grafeno e do nióbio, mas o silício ainda é o insumo mais importante nesse processo.

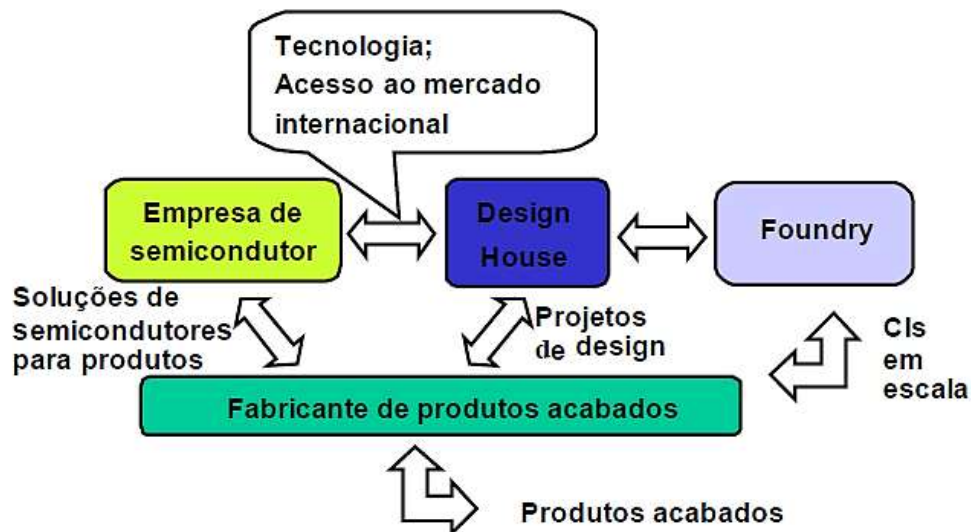
Há grande interesse em temas relacionados à nanociência e nanotecnologia. A miniaturização e integração dos circuitos eletrônicos contribuíram, em grande parte, para impulsionar a pesquisa e desenvolvimento de sistemas em escalas cada

vez menores. Novas aplicações tecnológicas vêm sendo estudadas, baseadas no fato de que muitos efeitos físico-químicos podem ser melhor explorados em escalas submicrométricas. Entretanto, muitos dos avanços só foram possíveis graças ao desenvolvimento de técnicas para a manipulação e caracterização de materiais em escala nanométrica (SILVA, 2013).

O nascimento das nanoestruturas e nanodispositivos semicondutores é relativamente recente tendo se desenvolvido com maior aceleração a partir do final dos anos 1980. A revolução da miniaturização continuou nas décadas de 1970 e 1980, quando se iniciou a fabricação de dispositivos e circuitos integrados digitais contendo componentes com dimensões submicrométricas (SILVA, 2002).

A cadeia de produção de um circuito integrado engloba - essencialmente as etapas de projeto, fabricação da lâmina (em que se lança mão de processos físico-químicos cada vez mais sofisticados), encapsulamento e testes. A atuação das empresas na cadeia de produção de circuitos integrados é representada na Figura 6 (PROGRAMA CI-BRASIL, 2006; ABDI, 2011).

Figura 6 – Fluxo de atuação das empresas produtoras de (CI's)



Fonte: Programa CI-Brasil (2006).

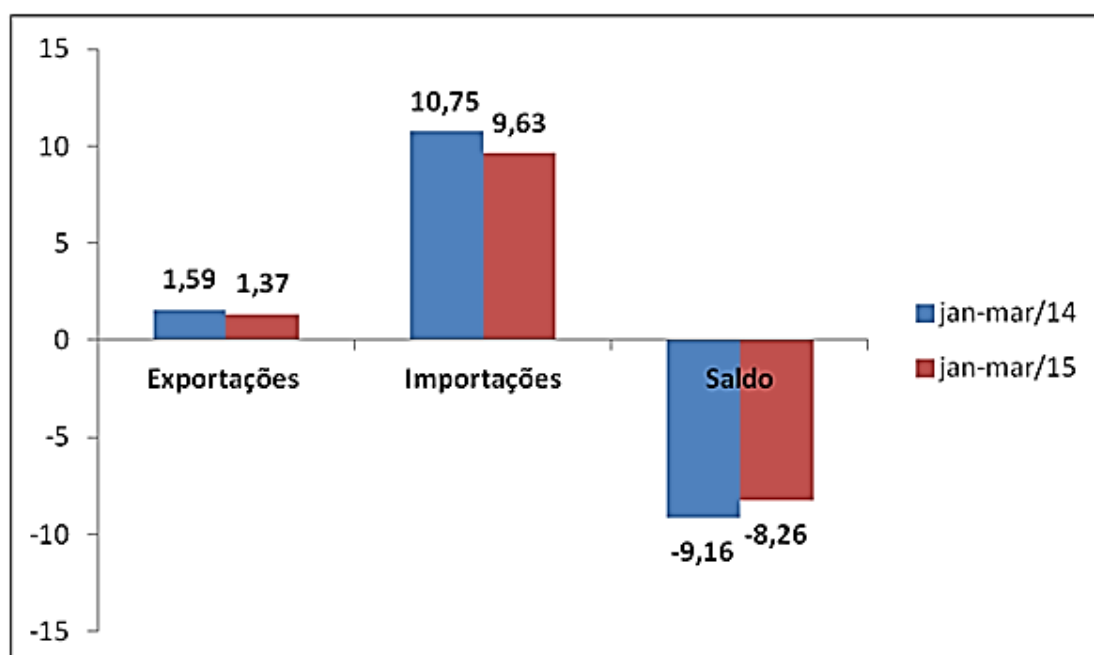
No Brasil, para fomentar o setor de semicondutores, em 2007, o Governo Federal criou a Lei Nº 11.484, que instituiu o apoio ao desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores. E através do decreto Nº 6233 de 2007 institui o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de

Semicondutores – PADIS com a finalidade de reduzir alíquotas de impostos (chegando a zero) para incentivos ao setor (BRASIL, 2007).

No aspecto de inovação, o Governo Federal do Brasil criou, em 2008, o Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada - CEITEC. Trata-se de uma empresa pública federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI. O investimento objetivou o desenvolvimento da indústria de microeletrônica brasileira por meio da implantação de uma base sólida no setor de semicondutores (CEITEC, 2008).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE, apesar dos investimentos na indústria da microeletrônica, o Brasil importa equipamentos eletroeletrônicos e o setor apresentou no 1º trimestre de 2015 déficit da balança comercial dos produtos elétricos e eletrônicos somando US\$ 8,26 bilhões, aproximadamente 11% abaixo do registrado no mesmo período de 2014 que foi de US\$ 9,16 bilhões como pode ser observado na Figura 7 (ABINEE, 2015).

Figura 7 – Balança comercial de produtos eletroeletrônicos em US\$ bilhões



Fonte: Adaptado de ABINEE (2015).

O cenário da balança comercial do setor de eletroeletrônicos do Brasil indicou que os semicondutores foram os itens mais importados do setor, somando US\$ 439 milhões em janeiro de 2017, resultado 129% acima do apontado em janeiro de 2016 que foi de US\$ 192 milhões conforme Tabela 3 (ABINEE, 2017).

Tabela 3 – Importação de semicondutores

PRODUTO	US\$ Milhões		Variação %
	2016	2017	
Semicondutores	192	439	129

Fonte: Adaptado de ABINEE (2017).

No Brasil, há quatro grandes produtores de semicondutores. Sendo:

- SMART Modular Technologies – Estado de São Paulo
- SEMIKRON Semicondutores Ltda – Estado de São Paulo
- CEITEC S.A – Estado do Rio Grande do Sul
- HT Micron – Estado do Rio Grande do Sul
- UNITEC Semicondutores – Estado de Minas Gerais.

No cenário global a *Semiconductor Industry Association* - SIA, que representa a liderança dos Estados Unidos da América – EUA na fabricação de semicondutores, anunciou que as vendas mundiais de semicondutores atingiram US\$ 29,0 bilhões no mês de outubro de 2015, 1,9% maior do que o registrado no mês anterior que foi de US\$ 28,4 bilhões e 2,5% inferior ao total registrado no mês de outubro de 2014 que foi de US\$ 29,7 bilhões (SIA, 2015).

De acordo com a SIA, a indústria de semicondutores emprega diretamente aproximadamente 242.337 pessoas nos EUA, suporta mais de um milhão de empregos adicionais na América. As empresas de semicondutores dos EUA investiram US\$ 34 bilhões em pesquisa e desenvolvimento em 2016 - a maior parcela de receita de qualquer indústria dos EUA e somente em 2016, havia cerca de 77 bilhões de semicondutores vendidos no país - cerca de 240 *chips* para cada americano (SIA, 2017).

Segundo o *World Semiconductor Trade Statistics* - WSTS, no mercado mundial de semicondutores para 2017, prevê-se que todas as principais categorias de produtos e regiões cresçam com a assunção de uma recuperação na economia macro ao longo do período de previsão e como resultado, o mercado mundial de semicondutores deverá aumentar 3,1% para US\$ 352 bilhões em 2017 (WSTS, 2015).

O setor de semicondutores está em pleno desenvolvimento que, além dos investimentos em tecnologia, a questão da qualificação da mão-de-obra deve ser considerada num projeto mais amplo e estratégico para o Brasil. Com possibilidades

de demanda crescente, as empresas do setor vêm buscando novas tecnologias e novos processos com o intuito de satisfazer suas necessidades produtivas e econômicas.

2.4.1 Resíduos da produção de semicondutores e análise de toxicidade

Os diversos processos de manufatura de semicondutores geram resíduos desde a fase inicial de tratamento e purificação do silício até o encapsulamento do *chip* para uso em circuitos integrados.

Para que esses resíduos sirvam de co-produtos, ou seja, possam ser utilizados com segurança e criar novos produtos ou em produtos já fabricados é preciso investigar suas propriedades biológicas e físico-químicas. Com os ensaios biológicos e de ecotoxicidade propõe-se avaliar a possibilidade de toxicidade dos resíduos da estação de tratamento de efluente e de lodo industrial. Para isso é necessária a utilização de alguns tipos de bioindicadores como, por exemplo: *Raphidocelis subcapitata* (alga) para verificação de toxicidade da água, *Eisenia andrei* (minhoca) para verificação da toxicidade do solo e *Allium cepa* (cebola) para avaliação de possível mutagenicidade.

Cada bioindicador pode auxiliar na estratégia de tomada de decisão de reuso dos co-produtos, pois cada um poderá revelar se há efeito tóxico em sua manipulação.

Toxicidade refere-se à capacidade de determinada substância, produto ou conjunto de substâncias de provocar efeitos danosos aos organismos com os quais entra em contato. Esses efeitos podem ser desde alterações comportamentais, alteração de crescimento ou reprodução até a morte dos organismos. Para estimar o grau de impacto que um determinado efluente pode causar no corpo receptor realizam-se ensaios de toxicidade, cujo objetivo é simular, em laboratório, os efeitos que poderiam ser observados no corpo receptor após o lançamento do efluente. Ensaio de toxicidade, ensaios ecotoxicológicos ou testes de toxicidade são sinônimos para denominar a principal ferramenta da ecotoxicologia para avaliar a toxicidade de efluentes (ARENZON, et al., 2011).

Estudos indicam análises de lodo e água residuária de processos industriais que corroboram com a viabilidade de uso dos co-produtos.

O lodo pode atuar como um meio concentrador para alguns produtos químicos durante o tratamento de águas residuais (PETRIE, et al., 2015).

Há diferentes tecnologias para tratamento de águas residuais industriais entre as opções físico-químicas e processos biológicos são utilizadas no tratamento bem sucedido de águas residuais (AWALEH, et al., 2014).

No caso de haver uma resiliência nos processos de tratamento de efluentes fazem-se necessários estudos de viabilidade técnica. Faltam elementos-chave, por exemplo, um estudo abrangente de estressores, propriedades e métricas, exemplos de estudo de caso, capacidade da busca por melhores práticas de intervenções ou conectividade com estruturas mais amplas e, além disso, a resiliência é vista como um custo adicional ou extra (JUAN-GARCÍA, et al., 2017).

Estudo referente ao tratamento de efluentes através de bioindicadores caracteriza-se como importante ferramenta de controle e identificação de toxicidade.

De acordo com o Centro de Informação Metal Mecânica - CIMM, a norma Brasileira – ABNT NBR 9800/87, caracteriza-se como efluente líquido industrial o despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanações de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico e, por muito tempo, não existiu a preocupação de caracterizar a geração de efluentes líquidos industriais e de avaliar seus impactos no meio ambiente. No entanto, a legislação vigente e a conscientização ambiental fazem com que algumas indústrias desenvolvam atividades para quantificar a vazão e determinar a composição dos efluentes industriais (CIMM, 2016).

Estudos realizados por Balsamo et al. (2016) mostraram que o efluente industrial de uma fábrica da microeletrônica foi capaz de inibir o crescimento da *Raphidocelis subcapitata* (alga) de forma proporcional à diluição empregada, sendo observada uma inibição de 85% no crescimento algal utilizando-se o efluente puro; na diluição a 50%, a inibição do crescimento algal observada foi de 83% e a diluição de 25% resultou em uma inibição de 58%.

As culturas com microalgas oferecem uma solução elegante para o dilema dos tratamentos de água residuária devido à capacidade de microalgas usarem nitrogênio inorgânico e fósforo para seu crescimento e também, por sua capacidade de remover metais pesados, assim como alguns compostos orgânicos tóxicos (ABDEL-RAOUF et al., 2012).

Como se trata de um bioindicador bastante empregado para esse fim, duas espécies de microalgas verdes, *Raphidocelis subcapitata* e *Chlorella vulgaris*, podem ser selecionadas como representativas de produtores primários, uma vez que são espécies padronizadas, facilmente cultiváveis em laboratório, são recomendadas por normas internacionais para estudos de ecotoxicologia e apresentam elevada sensibilidade a uma vasta gama de contaminantes (EC, 1992; USEPA, 1994; OECD, 2006 apud TAVARES, 2014). No contexto de produtores primários tem-se a cadeia alimentar de algumas espécies de animais.

Algumas substâncias são específicas para ensaios ecotoxicológicos como descrito por Santos et al. (2007) que teve como objetivo estabelecer o uso de uma substância de referência mais segura em testes mensais de sensibilidade no laboratório de ecotoxicologia do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, em que avaliou o cloreto de sódio como possível substituto dos metais, em um período de dois anos, para os seguintes organismos: *Chironomus xanthus*, *Daphnia magna*, *Hydra attenuata* e *Pseudokirchneriella subcapitata*.

Na análise de possível contaminação de solo são empregados o uso de bioindicadores como é o caso da *Eisenia andrei* (minhocas). Os organismos de solo desempenham importante função no ecossistema e tem papel essencial na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e estabilidade estrutural do solo (GARCIA, 2004). A planta *Allium cepa* (cebola) pode revelar efeitos mutagênicos em sua estrutura e comprovar ou não a toxicidade de um efluente industrial (MA et al., 1985).

2.4.2 Aplicação de silício na indústria da construção civil

Entre os insumos-base destinados à construção civil, como já destacado, o silício está presente na composição dos materiais. Neste tópico, o silício será analisado como insumo na composição de argamassa de concreto visto estar presente na areia e no cimento.

Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS, a cadeia de materiais de construção civil consome aproximadamente metade das matérias-primas extraída da natureza. É um aglomerado de diversas cadeias produtivas, composta de empresas de tamanhos e capacidades técnicas, gerenciais e econômicas muito variáveis (CBCS, 2014).

As bases de insumos para a indústria da construção civil são o cimento, a areia e água. O cimento Portland é a denominação convencionalmente mundialmente para o material conhecido na construção civil. Trata-se de um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe. O acréscimo de argila de pozolana, um composto que possui sílica reativa e em contato com a cal atua como ligante hidráulico, confere ao cimento uma maior impermeabilidade e maior durabilidade em estruturas que entram em contato com sulfatos. Pozolana significa que é de origem vulcânica e misturado a outros insumos é empregado como cimento. A sílica é a denominação dada a um grupo de minerais, cuja composição é de dióxido de silício e constitui o grupo das sílicas: quartzo, tridimita, cristobalita e opala. São sólidos, cristalinos, constituídos de moléculas gigantes, apresentando célula unitária como um tetraedro, contendo no seu centro um átomo de silício e, nos vértices, aparecem átomos de oxigênio. A microsílica é uma variedade amorfa de sílica, que se forma no processo de produção de ferro silício e do silício metálico e é coletada nos filtros de tratamento dos gases efluentes dos fornos. É usada como aditivo na produção do cimento Portland e na preparação de determinados tipos de concreto de alta resistência como também na indústria de cerâmica e de refratários. Sabendo-se que a sílica é um dos compostos agregados à argamassa de concreto, análise por peneiramento pode identificar a composição granulométrica desse agregado. Pode-se considerar que a sílica possui características nanométricas e é uma das adições minerais de maior reatividade, em função do tamanho. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem vezes menor que o do cimento e por ser mais fina que as do cimento, as partículas da sílica geram uma estrutura com maior homogeneidade reduzindo os vazios da estrutura do concreto (ABCP, 2002; FIESP, 2006; FONSECA, 2010; PORTAL DO CONCRETO, 2015; MINASLIGAS, 2015; CIMM, 2017).

2.5 Produção de telhas de concreto

Na produção de artefatos de concreto são observadas particularidades em relação aos insumos utilizados na composição da massa. Para efeito desta pesquisa, serão considerados cimento, areia e água. Os concretos, em geral,

absorvem água e não são completamente impermeáveis, devendo-se acrescentar, na massa, aditivos especiais para a impermeabilização ou colocar revestimentos impermeáveis, quando for necessária uma estanqueidade total. O concreto de cimento comum tem excelente resistência à atmosfera, às águas neutras ou alcalinas, aos álcalis, às soluções salinas, aos óleos e aos compostos orgânicos em geral. Para a maioria desses meios, o concreto é completamente inerte, resistindo por tempo indeterminado (TELLES, 2003).

De acordo com a literatura, a dimensão de uma estrutura de concreto é baseada no projeto, considerando-se variáveis como o fator de resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}). A força característica da compressão indicada por (f_{ck}) é uma das entradas usadas para o projeto arquitetônico (NEVILLE, 2015). De acordo com Fernandes (2012), os tipos de cimento que podem ser utilizados para a produção de telha de concreto são: CP II-F 32; CP II-E 32; CP II-Z; 32; CP III 40 e CP V ARI (Alta Resistência Inicial).

Especificação do cimento Portland conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP:

Cimento Portland - CP II (ABNT NBR 11578/91): O cimento Portland composto é modificado. Gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo cimento Portland comum. Seu uso é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, em que o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Esse cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Recomendações de cada tipo de CP II:

Cimento Portland CP II-Z (com adição de material pozolânico) – Empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. E para produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com esse produto é mais impermeável e por isso mais durável.

Cimento Portland Composto CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno) – Composição intermediária entre o cimento Portland comum e o cimento Portland com adições (alto-forno e pozolânico). Esse cimento combina com bons resultados o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do cimento

Portland comum. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou possam ser atacadas por sulfatos.

Cimento Portland Composto CP II-F (com adição de material carbonático – *filler*) – Para aplicações gerais. Pode ser usado no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros.

Cimento Portland de Alto Forno CP III (com escória – ABNT NBR 5735/91): Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação geral em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, de concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro e outras. Mas é vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

Cimento Portland CP V - (Alta Resistência Inicial - ARI – ABNT NBR 5733/91): Com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa¹⁰ (Mega Pascal) a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente, o CP V (ARI) é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Pode ser utilizado no preparo de concreto e argamassa em obras desde as pequenas construções até as edificações de maior porte, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é

¹⁰ MPa – O cálculo de uma estrutura de concreto é feito com base no projeto arquitetônico da obra e no valor de algumas variáveis, como por exemplo, a resistência do concreto que será utilizado na estrutura. Portanto, a Resistência Característica do Concreto à Compressão (f_{ck}) é um dos dados utilizados no cálculo estrutural. Sua unidade de medida é o MPa (Mega Pascal), sendo: Pascal: Pressão exercida por uma força de 1 Newton, uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, perpendicular à direção da força. Mega Pascal (MPa) = 1 milhão de Pascal = 10,1972 Kgf/cm² (Portal do Concreto, 2016).

conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V (ARI) adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

A areia é constituída por sedimentos clásticos gerados por processos de fragmentação de rocha, composta por partículas de quartzo, podendo conter minerais secundários. Os processos de desagregação e transporte podem ocorrer em meio aquoso ou eólico. As características físicas dos grãos, tais como as dimensões, grau de arredondamento e de esfericidade estão relacionadas com a distância de transporte e o meio em que as partículas foram transportadas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT define escalas referentes a granulometria das areias conforme a norma ABNT NBR 7211/83. A granulometria é a distribuição, por tamanhos das partículas de uma amostra que compõe um agregado, com sua quantificação em peso. Para se conhecer essa distribuição das partículas que compõem a amostra de um agregado, as mesmas são separadas por meio de peneiras, determinando-se o peso das partículas em cada peneira. A fração granulométrica é a quantidade de agregado que passa por uma malha e fica retido em outra malha. Os ajustes granulométricos consistem em ajustar a granulometria de um agregado a um determinado uso. No que se refere à qualidade da água é essencial, uma vez que é usada em grande quantidade em quase todas as etapas do processo de fabricação dos produtos para a construção civil e de cerâmicos, na preparação da argila e de esmaltes líquidos, nos corpos de argila para extrusão e moldagem, e na moagem por via úmida (FIESP, 2006; MME, 2009; GUERRA, 2013; ABCP, 2017).

2.5.1 Telhas de concreto: produção e agregados

As telhas de concreto foram inventadas em meados do século 19 por Adolf Kroher, da Bavaria, aproximadamente vinte anos após o registro da patente do cimento Portland, por Joseph Aspdin, em 1824. No Brasil, o crescimento do setor de telhas de concreto, nos últimos anos, representa 7% do mercado nacional de cobertura. O setor de telhas de concreto tem um enorme potencial de crescimento para os próximos anos e o uso de telhas de concreto na Europa é de aproximadamente 60% do mercado de cobertura (FERNANDES, 2012).

O setor da construção civil busca alternativas para substituição de produtos com aplicação de novos insumos e novas tecnologias de reaproveitamento de resíduos. Como exemplo, o setor de telhas vem empregando, ao longo dos últimos anos, investimentos em pesquisas para novos materiais e novos processos industriais.

Nos Estados Unidos da América, também adotam-se estratégias de reuso de resíduos para produção de telhas de concreto, utilizando matérias-primas de origem local que reduzem o custo com energia e transporte (BORAL, 2015).

Com o objetivo de se avaliar a utilização de resíduos como materiais agregados na indústria da construção civil, foram encontradas as seguintes pesquisas. Estudo referente aos resíduos de telhas cerâmicas como material de substituição ao cimento Portland indica as porcentagens de resíduos cerâmicos (de 15% a 50% em massa) para substituir o cimento Portland e foram utilizadas para avaliar o comportamento pozolânico desse material. As amostras foram curadas a 20°C durante diferentes tempos de cura. Um ganho de resistência devido à atividade pozolânica foi observado após 28 dias e 90 dias de cura. Os resultados demonstram que as argamassas com até 35% em massa de resíduos cerâmicos cumprem os requisitos estabelecidos para os materiais pozolânicos (MAS et al., 2015).

Os resíduos cerâmicos podem ser transformados em agregados de pedra triturada em vez de agregados grosseiros e o estudo experimental indicou que é viável a reciclagem de resíduos cerâmicos como agregado bruto para a produção de artefatos de concreto não estrutural (TABAK et al., 2012).

Resíduos de revestimentos cerâmicos na produção de cimento, como resíduos de telhas, exibem propriedades pozolânicas e propriedades químicas e físicas do cimento, e estão em conformidade com o padrão de cimento até a adição de 35% de telha residual (AY et al., 2000).

Nas pesquisas de Manogna (2015), a utilização do pó de telha e a sua aplicação para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção é a solução mais eficiente e também aborda a aplicação de alto valor e o concreto produzido com pó de telha tem maior desempenho e durabilidade. Os testes de resistência à compressão, de resistência à ruptura e de resistência à flexão foram realizados no final de 7, 28 e 56 dias, respectivamente, nas amostras de concreto. Os resultados mostraram que as resistências à compressão, à ruptura e à flexão do

concreto diminuem gradualmente durante 7 dias de ensaio. Por 28 e 56 dias a resistência do concreto aumenta até 30%.

A Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI da Unicamp já utiliza o “biokreto”, uma mistura de cimento com casca de arroz, bambu, sisal ou partículas de eucalipto. O concreto, que substitui a brita por partículas vegetais, está em floreiras, casebres, quiosque, canal de irrigação, telhas impermeáveis e até mesmo do chão ao teto do pavimento onde funciona um campo experimental. O objetivo do projeto é estimular o reaproveitamento de resíduos naturais na construção rural. O concreto está presente também em paredes construídas com blocos de cimento (CRUZ, 2002).

A adoção de redes estratégicas de simbiose industrial para reaproveitamento de resíduos na construção civil poderá tornar as empresas mais competitivas e sustentavelmente eficientes.

De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS, a redução do consumo de matérias-primas é uma prioridade e a promoção da industrialização da construção permitirá reduzir as perdas e, em consequência, os impactos ambientais da construção em como reduzir a geração de resíduos na construção. A sustentabilidade depende da inovação, e a criação de um programa de fomento à ecoinovação tem um potencial significativo de retorno ambiental e de ganho de competitividade da indústria (CBCS, 2014).

Segundo Leite (2009), além das oportunidades econômicas oriundas dos reaproveitamentos, reutilizações, reprocessamentos, reciclagem, a questão da sustentabilidade empresarial dirigirá esforços das empresas para a defesa de sua imagem corporativa e de seus negócios, enquanto as sociedades se defenderão por meio de legislações e regulamentações específicas.

Das diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos, no capítulo I das disposições preliminares da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, Lei Nº 12.305/2010, Artigo 13, para os efeitos dessa Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

- Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais.
- Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

No contexto do consumo de água como insumo para processos produtivos, as indústrias respondem por cerca de 20% do consumo total de água no Brasil, e uma parte dessa demanda é extraída diretamente dos corpos d'água. Nos últimos anos, as empresas vêm despertando para a reutilização da água mediante a incorporação de tecnologias inovadoras no tratamento tanto da água bruta como dos efluentes de seus processos, que podem ser transformados em matéria-prima (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2012).

O setor de telhas de concreto tem um impacto significativo na extração de água como insumo básico para a produção chegando a 38% do volume de retirada de água (IMPACT, 2002 apud ANICER, 2011).

O desenvolvimento das sociedades humanas é dependente da disponibilidade de água com qualidade adequada e quantidades, para uma variedade de usos que variam de doméstico para fornecimentos industriais e industrialização rápida, impactando o meio ambiente global (HANGARGEKAR et al., 2015).

Devido a questões operacionais, algumas empresas extraem esse recurso por meio de poços artesianos, requerendo controles e autorizações especiais.

Segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP, o Estado é o maior usuário das reservas hídricas subterrâneas do país. Cerca de 65% da zona urbana e aproximadamente 90% das indústrias paulistas são abastecidas, de forma parcial ou total, por poços artesianos.

A licença para perfuração e utilização de um poço é concedida pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, que estabelece as normas que regem o projeto de construção de poços tubulares profundos e controlam sua utilização.

O Brasil possui uma reserva subterrânea com mais de 111.000 km³ de água. O litro de água retirada de um poço custa 15 vezes menos do que o litro de água retirada de fontes superficiais, como os rios (SABESP, 2016).

De acordo com o DAEE, a Lei Estadual Nº 12.183/2005 dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos do domínio do Estado de São Paulo, os procedimentos para fixação dos seus limites, condicionantes e valores e dá outras providências. Do objetivo e da implantação da cobrança no Artigo 1º, a cobrança pela utilização dos recursos hídricos objetiva:

- Reconhecer a água como bem público de valor econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor;
- Incentivar o uso racional e sustentável da água;
- Obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos e saneamento, vedada sua transferência para custeio de quaisquer serviços de infraestrutura;
- Distribuir o custo sócio-ambiental pelo uso degradador e indiscriminado da água;
- Utilizar a cobrança da água como instrumento de planejamento, gestão integrada e descentralizada do uso da água e seus conflitos.

2.5.2 Pesquisa de patentes de telhas produzidas com resíduos de silício

No intuito de avaliar se já há projetos para produção de telhas com resíduo de silício no Brasil, foi efetuada busca por patentes realizada no banco de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI através do programa Espacenet¹¹. Observou-se a não exatidão da pesquisa devido a incertezas como período de sigilo, erros, omissões ou atrasos com relação a atualizações em banco de dados no INPI. Os resultados obtidos apresentam apenas o *status* da situação jurídica atual e a forma como os processos podem afetar o depósito pretendido.

O INPI propõe um programa denominado “Patentes Verde”, cujo objetivo é contribuir com o meio ambiente e visa acelerar o exame dos pedidos de patentes relacionados às tecnologias voltadas para a questão ambiental - Resolução Nº 175/2016. Com essa iniciativa, o INPI também possibilita a identificação de novas tecnologias que possam ser rapidamente usadas pela sociedade, estimulando o seu licenciamento e incentivando a inovação no país.

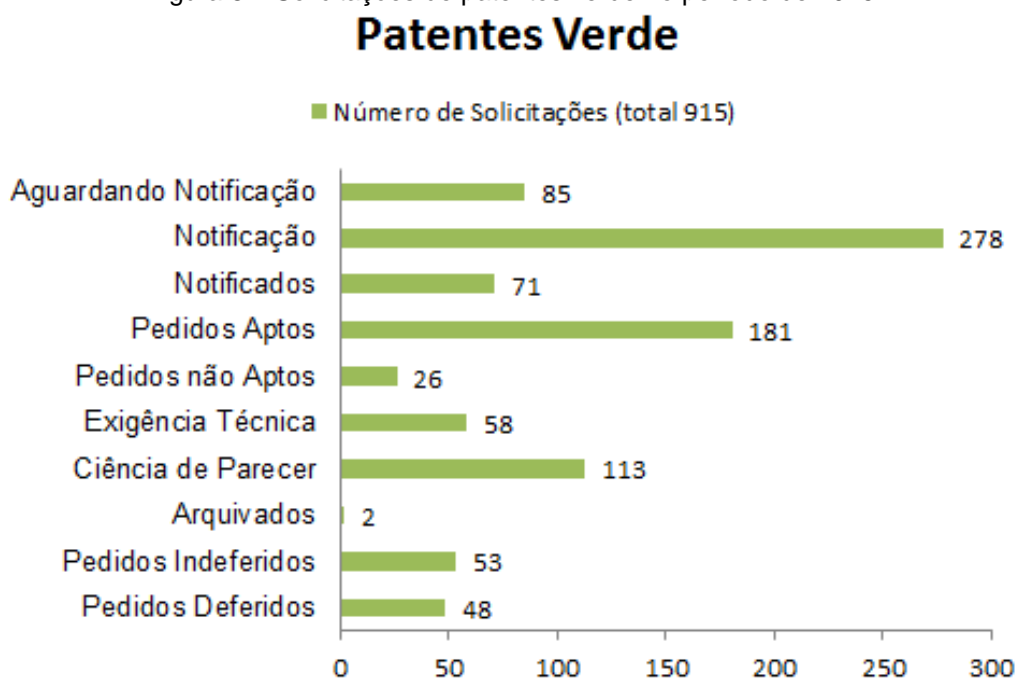
O programa piloto “Patentes Verde” teve início em 2012 e sua terceira fase encerrou-se em abril de 2016. A partir de dezembro de 2016, o INPI passou a oferecer o exame prioritário de pedidos relacionados a tecnologias verdes como serviço (INPI, 2016). Na Figura 8 é possível observar o número de solicitações de

¹¹ Espacenet - https://pt.espacenet.com/mydocumentslist?submitted=true&locale=pt_PT (INPI).

patentes verde no período de 2015, totalizando 915 solicitações. Dentre as opções para solicitação de patente verde, o programa contempla:

- Eliminação de resíduos
- Tratamento de resíduos
- Reutilização de materiais usados
- Produção de cimento hidráulico a partir de resíduos
- Utilização de resíduos como material para argamassas ou concreto
- Utilização de resíduos para a produção de fertilizantes
- Recuperação ou aproveitamento de resíduos

Figura 8 – Solicitações de patentes verde no período de 2015



Fonte: Adaptado de INPI (2015).

Para a proposta de reuso de resíduo industrial contendo silício, foi efetuada uma pesquisa na base Brasil do Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI. Como objeto da pesquisa, a busca teve abrangência na fabricação de telhas a partir de lodo industrial; telhas e resíduo industrial. Mesmo com limitações na pesquisa, não foram encontradas patentes, cujo objeto é a fabricação de telhas a partir de resíduo industrial contendo silício proveniente do processo de produção de semicondutores. Encontraram-se seis registros de reaproveitamento de outros resíduos na composição de artefatos de concreto que estão no Apêndice A.

2.5.3 Características e processo de produção das telhas de concreto

A fabricação de telhas de concreto possui uma tecnologia bem estabelecida e é considerada uma ciência exata, a areia é graduada e testada sob condições de laboratório, as telhas são testadas em equipamentos específicos. A telha não é mais prensada, mas extrusada, eliminando as laminações que resultaram da prensagem (DANCO ROOFING, 2016).

Areia, materiais cimentícios, cargas de calcário e água são os principais ingredientes (em massa) de telhas de concreto. Os pigmentos são adicionados para a cor e polímeros são utilizados como um revestimento à prova de água sobre a superfície da telha (AKBARI et al., 2003).

As telhas de concreto apresentam tolerâncias dimensionais mais precisas, menor quantidade de telhas por m², maior resistência e baixa absorção de água (GUIA DA CONSTRUÇÃO, 2012). No Brasil, a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 13858-2/97 define as especificações técnicas para produção e ensaios em telhas de concreto. A telha de concreto padrão de mercado modelo “*coppo vêneto*”, Figura 9, possui as seguintes características técnicas:

- Largura de 330 milímetros;
- Comprimento de 420 milímetros;
- Peso médio aproximado 4,70 kg;
- Absorção de água <10%;
- Resistência ≥ 240 kgf.

Figura 9 – Telha de concreto modelo *coppo vêneto*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4, são apresentados os valores de resistência à flexão de uma telha padrão de mercado com base na classe e profundidade do perfil e a carga de ruptura em Newton (N).

Tabela 4 – Resistência à ruptura em função da altura do perfil

Resistência à Flexão		
Classe do Perfil	Profundidade do perfil (d) (mm)	Carga de Ruptura à Flexão (N)
A	$d \geq$	2400
B	$40 < d \leq 50$	
C	$30 < d \leq 40$	
D	$20 < d \leq 30$	
Plana	$d < 20$	1200

Fonte: Adaptado de Fernandes (2012).

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica - ANICER, as telhas de concreto e de cerâmica têm vida útil de 20 anos. Na Figura 10, são representados os limites do sistema com relação ao ciclo de vida das telhas de concreto. Observa-se no fluxo que as telhas possuem um ciclo de vida e ao longo da cadeia produtiva, há particularidades na gestão de resíduos, desde a aquisição da matéria-prima até a produção e o transporte do produto final. Quanto mais fechado o ciclo, mais vantagem competitiva o mesmo pode oferecer ao setor.

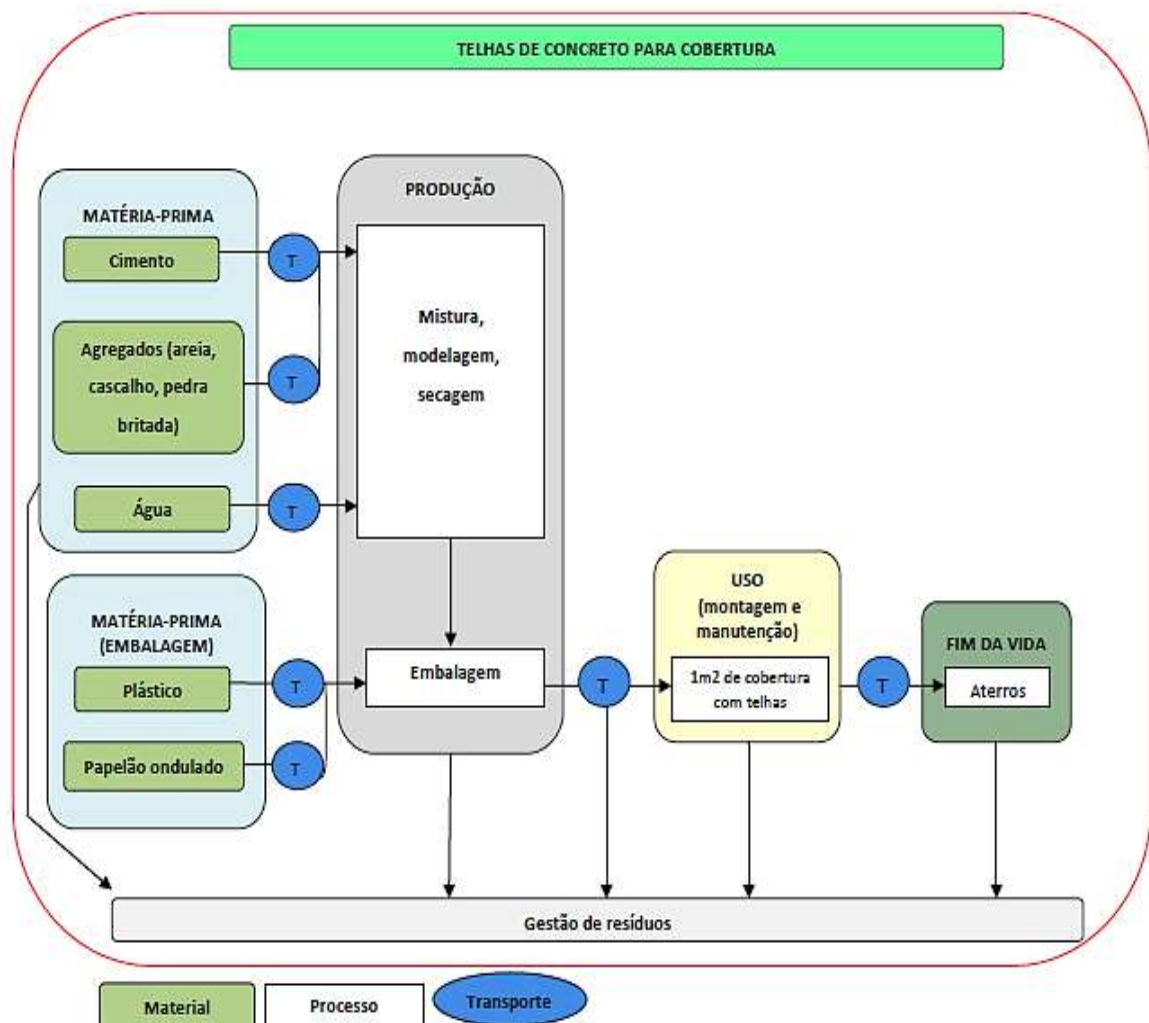
Uma ideia erroneamente difundida é a de que a telha de concreto é mais pesada que a telha convencional de cerâmica. Calcula-se o peso do telhado com a telha molhada e a telha de concreto molhada pesa, em média, apenas 5% a mais do que seu peso seco apesar da absorção permitida por norma ABNT NBR 13858-2/97 ser de até 10%. A telha de cerâmica molhada pesa, em média, 16% a mais do que seu peso seco (FERNANDES, 2012).

Para as telhas cerâmicas, são necessárias 16 telhas para cobrir uma área de 1 m² de telhado, enquanto para o telhado com telhas de concreto corresponde a 10,4 telhas. A estrutura construída para suportar o telhado é considerada equivalente para ambas às alternativas (SOUZA et al., 2015).

As telhas de concreto são obtidas através de um processo de extrusão de argamassa que possui uma granulometria balanceada com os grãos mais finos ocupando os vazios entre os grãos maiores, restando um mínimo de espaços para serem preenchidos pela pasta de cimento (FERNANDES, 2012).

A produção da telha de concreto se dá a partir da adição de pigmentos coloridos diretamente à mistura planetária com utilização de cimento Portland, areias e agregados selecionados – finos, médios e grossos – com adição de água na quantidade suficiente para cada mistura desejada (ITAMBÉ, 2010). Segundo Fernandes (2012), os maiores problemas de qualidade da telha de concreto estão relacionados ao uso de misturas secas, com umidade inferior à umidade que proporciona o melhor adensamento, ou seja, quanto mais constante for o grau de umidade da mistura, mais constante será a qualidade da telha, sobretudo nos quesitos adensamento, densidade, peso, impermeabilidade e, como consequência, resistência à flexão.

Figura 10 – Limites do sistema com relação ao ciclo de vida das telhas de concreto



Fonte: Adaptado de ANICER (2011).

De maneira simplificada, a seguir é representada a sequência da produção de telhas de concreto:

- A areia é transportada por pá-carregadeira até o silo;
- A areia é pesada de acordo com a quantidade de telhas a serem produzidas;
- Adicionam-se os demais insumos;
- A massa é homogeneizada até obtenção da mistura/traço¹² padrão;
- O dosador de massa é acionado;
- A massa é extrusada (durante esse processo há compactação da massa sobre o molde);
- Rebarbação das laterais da telha;
- Desmoldagem da telha;
- As telhas são acondicionadas em gaiolas para transporte interno;
- Seguem para a estufa;
- Após secagem são paletizadas;
- Em seguida, há o “streichamento” (embalagem) do *pallet* para transporte externo.

Na Tabela 5, apresenta-se o fluxo sequenciado do processo de produção em uma indústria de telhas e suas etapas são visualizadas na Figura 11.

Tabela 5 – Fluxo do processo de produção de telhas de concreto

Fluxo	Fases do processo de produção das telhas
1	Silo de areia
2	Silo dosador com balança
3	Misturador de insumos
4	Homogeneização da mistura (traços)
5	Dosador da massa
6	Extrusão e corte
7	Rebarbação
8	Desmoldagem
9	Acondicionamento em gaiolas
10	Estufa
11	Paletização
12	Streichamento dos paletes para transporte

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹² O termo “traço” refere-se a indicação da proporção dos componentes utilizados para produção da argamassa de concreto.

Figura 11 – Fluxo sequenciado do processo de produção de telhas de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, desenvolveu-se pesquisa exploratória do tema em estudo por meio de revisão bibliográfica da literatura (estudo teórico), visitas às empresas parceiras de semicondutores e de telhas de concreto (estudo de campo), e serão realizadas

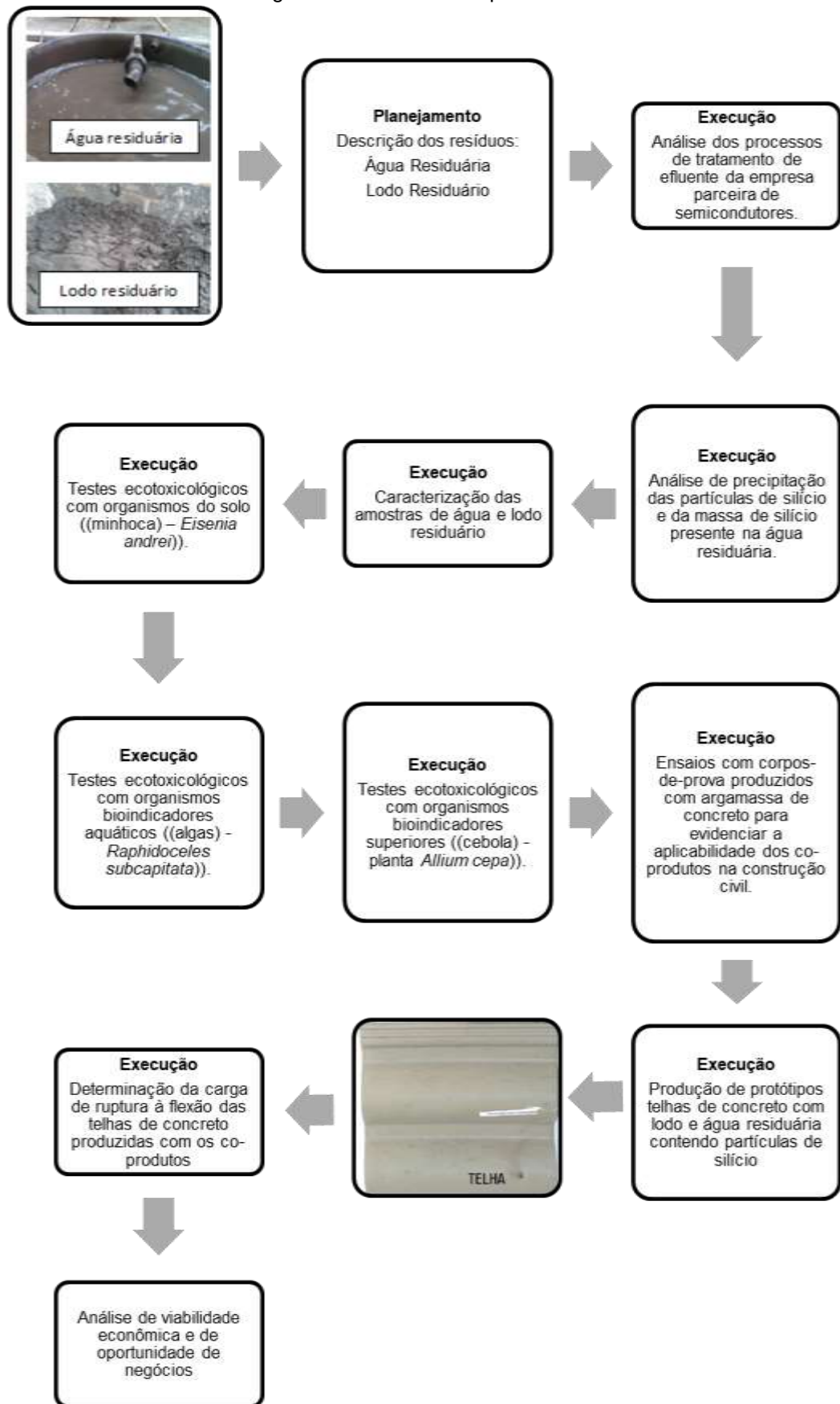
pesquisas de laboratórios que possam possibilitar o acompanhamento na produção de telhas, mediante emprego de resíduos da indústria de semicondutores com objetivo de estruturação do fluxo desta tese. No próximo capítulo, explicitar-se-ão as metodologias utilizadas na realização da pesquisa.

3 METODOLOGIA

A opção pelos setores da eletroeletrônica, especificamente, o de dispositivos semicondutores, e de telhas de concreto se deu em função da possibilidade da utilização dos co-produtos na indústria da construção civil. A hipótese de que os resíduos gerados na operação de lapidação, polimento e corte das lâminas/*wafer* de silício pudessem ser agregados à argamassa na construção de telhas de concreto induziu às verificações empíricas para avaliar-se como a nova composição altera as propriedades do produto original.

A não variação das propriedades por si só já representaria um ganho ambiental pelo aproveitamento dos resíduos. Caso represente ganhos nessas propriedades abrem-se novas perspectivas de estímulos a novos negócios. Para essa avaliação elaborou-se um fluxo dos experimentos representados na Figura 12 como: descrição dos resíduos (água e lodo residuários), e dos processos de tratamento de efluente da empresa de semicondutores; análise de precipitação das partículas de silício e da massa de silício presente na água residuária; caracterização das amostras de água e lodo residuário; testes ecotoxicológicos com organismos do solo *Eisenia andrei* (minhoca); testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores aquáticos *Raphidocelis subcapitata* (algas); testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores superiores *Allium cepa* (cebola); ensaios com corpos-de-prova produzidos com argamassa de concreto para evidenciar a aplicabilidade dos co-produtos na construção civil; produção de protótipos de telhas de concreto com lodo e água residuária, contendo partículas de silício; determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com os co-produtos e análise de viabilidade econômica e de oportunidade de negócios.

Figura 12 – Fluxo dos experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Aspectos metodológicos

Para contemplar os escopos da tese, foram utilizados os métodos que atendem à pesquisa exploratória. Além da pesquisa bibliográfica, foram necessários, contatos, entrevistas, acertos com empresas e laboratórios para cessão de material e equipamentos, acompanhamento na construção de protótipos e realização de testes. Foi por meio da pesquisa exploratória que se planejou e estabeleceu o desenho para realização da tese.

Entretanto, a pesquisa está alicerçada no empirismo e amparada na literatura a respeito dos setores em estudo. Entende-se por pesquisa empírica, a atividade de prospecção de informações advindas de experimentação e da prática, levando o pesquisador a novas conclusões baseadas em experimentações prévias, desenvolvidas por outros experimentadores. Tais conclusões são o resultado da nova perspectiva com a qual ele observa e analisa os acontecimentos em estudo, o que leva à expansão e ao esclarecimento do conhecimento. Segundo Fantinato (2015), o método de pesquisa empírica pode ser baseado na experiência comum e na observação; um fato que se apoia somente em experiências vividas, na observação de coisas, e não em teorias. Também feito por meio de tentativas e erros, caracterizado pelo senso comum, e cada um compreende à sua maneira.

O cenário de estudo é composto por uma indústria de dispositivos semicondutores e pela indústria de telhas de concreto denominadas de empresas parceiras. A empresa parceira do setor de dispositivos semicondutores está sediada em um distrito industrial que realiza o processo de encapsulamento, a partir de lâminas de silício, processo conhecido na fabricação de *chip* como *back-end*.

Através de projeções aproximadas de valores e limitações dos fluxos de processo de tratamento dos resíduos, para o desenvolvimento das pesquisas e por questões de confidencialidade foi necessário estabelecer acordo de não divulgação *Non-Disclosure Agreement* – NDA.

A partir de projeções financeiras e dos fluxos de tratamento, como propostas para simbiose industrial, foram considerados fabricantes de telhas de concreto sendo um de grande porte e outro de pequeno porte na mesma região da empresa parceira de semicondutores. A proposta deve-se às questões geográficas e de logística que poderão reduzir os custos de operações de transporte e armazenagem dos co-produtos.

Em se tratando de produto novo para a construção civil, com alto grau de manipulação, realizado com uso de resíduos, predominantemente o silício, originário de outra empresa, foi preciso, antecipadamente, avaliar o risco de seu uso, de sua toxicidade.

Os testes de toxicidade dos propostos co-produtos podem ou não indicar sua aplicabilidade como insumos a outros processos produtivos. A ecotoxicologia pode ser entendida com a junção de ecologia e toxicidade. Ecologia é o estudo da interação dos seres vivos entre si e com o meio ambiente em que vivem; toxicologia é uma ciência que procura entender os tipos de efeitos causados por substâncias químicas, bioquímicas e os processos biológicos responsáveis por tais efeitos. Leva-se em conta a sensibilidade de diferentes tipos de organismos à exposição de substâncias químicas e as relativas toxicidades de diferentes substâncias. O objetivo da ecotoxicologia é entender e prever efeitos de substâncias químicas em seres vivos e comunidades naturais (CHAPMAN, 2002 apud MARIANI, 2016).

Os testes e experimentos foram executados conforme normas e metodologias específicas realizados no Laboratório de Ecotoxicologia da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC – Sorocaba), no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – São Paulo) e nos Laboratórios de análises químicas e ensaios de resistência à flexão da empresa Falcão Bauer e após obtenção dos resultados experimentais, foi avaliada a possibilidade de aplicação dos co-produtos como insumos para a produção de telhas de concreto, para possível reuso do efluente. Exploram-se as potencialidades de simbiose industrial entre os setores produtivos.

3.1.1 Descrição dos resíduos (água e lodo residuários), e dos processos de tratamento de efluente da empresa de semicondutores

O processo de geração do resíduo inicia-se quando a *wafer* de silício entra na máquina denominada *Grinding*, passando por processo de lapidação e posteriormente o corte individualizado dos *chips*.

Segundo Maia (2013), o processo *Grinding*, tem a função de redução da espessura das *wafers* vindas do *front-end*. Essa redução é feita através de um processo de desgaste mecânico por contato na parte de trás das *wafers*. O processo de corte das *wafers* é através de discos diamantados e é realizado por lâminas

(*blades*) construídas com características próprias para o corte de silício. A lâmina é constituída por partículas abrasivas (normalmente diamante) e um material aglomerante para mantê-las coesas.

Durante esse processo é gerado grande volume de água contaminada com pó de silício, e após tratamento de efluente compõe o lodo residuário (pastoso) e água reciclada. No processo mencionado, a água é utilizada para evitar o superaquecimento do equipamento de corte das *wafer*.

Contudo, a reciclagem da água não pode ocorrer indefinidamente, pois sais solúveis começam a acumular-se no fluido. Após o processo de corte das lâminas, internamente há fluxo dos resíduos e parte da água não é reciclada, mas eliminada para o processo de tratamento interno.

Na Figura 13, é identificado o fluxo ilustrativo de tratamento da água que, de acordo com a empresa parceira, todo sistema custa aproximadamente US\$ 39.000,00/mês. O efluente interno é submetido a tratamento conforme normas e legislações específicas, passando por fases de filtragem e centrifugação até a obtenção do lodo residuário e, ao final do processo de tratamento, a água tratada é lançada em efluente externo à empresa.

Com relação à água de entrada, como a empresa de semicondutores está instalada em um distrito industrial, esta não é abastecida por uma empresa de saneamento básico e sua captação de água é através de poço artesiano.

Para a empresa parceira, o consumo aproximado é de 3200 m³ de água/mês com custo de US\$ 8,71/m³. Todo processo é baseado em cálculos geológicos com base na vazão da estação de tratamento de efluente - ETE, e da vazão do rio o que é monitorado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB.

- Posição 1 – Água residuária sem tratamento no tanque de monitoramento;
Posição 2 – Lodo residuário de silício;
Posição 3 – Água pós-tratamento interno para descarte em efluente externo.

Figura 14 – Sequência do Processo de Tratamento



Fonte: Empresa parceira de semicondutores.

A empresa de semicondutores descarta, em média, 1300 m³/mês de água residuária o que equivale a aproximadamente 1300 toneladas. Após o processo de tratamento interno geram-se aproximadamente oito toneladas de lodo residuário/mês. Para o descarte da água em efluente, a empresa possui outorga de lançamento, atendendo todos os parâmetros legais.

Para dar uma noção de grandeza, uma piscina olímpica¹⁶ comporta aproximadamente 2000 m³ de água. Após tratamento, parte da água é enviada para efluente externo e o lodo é encaminhado para aterro industrial. Os aterros industriais são classificados nas classes I, II ou III, conforme a periculosidade dos resíduos a serem dispostos. Os aterros classe I podem receber resíduos industriais perigosos; os classe II, resíduos não inertes; e os classe III, somente resíduos inertes (CIMM, 2017). Para os resíduos sólidos, a norma ABNT NBR 10664/89 prescreve os métodos de determinação das diversas formas de resíduos (total, fixo, volátil; não filtrável, não filtrável fixo e não filtrável volátil; filtrável, filtrável fixo e filtrável volátil) em amostras de águas, efluentes domésticos e industriais, lodos e sedimentos.

É de responsabilidade da empresa de semicondutores monitorar o consumo, o lançamento e o reuso da água por metro cúbico. Antes do processo de filtragem por osmose e centrifugação, a água residuária passa por tanques de monitoramento. Após a fase de filtragem, a massa úmida de lodo residuário, que é descartada em caçambas metálicas, é destinada para aterro industrial com um custo aproximado de

¹⁶ Comitê Olímpico do Brasil, 2015.

US\$ 35,00/tonelada e a operação com transporte é de aproximadamente US\$ 350,00 por viagem, e que a cada viagem transportam-se 2 toneladas de resíduo.

O lodo é constituído de silício grau eletrônico, com a adição de sais de alumínio e hidróxidos, cujo objetivo é provocar a precipitação. O tamanho da partícula de silício é aproximadamente de 3 a 5 micra.

Como o pó de silício é extremamente fino, a precipitação natural fica prejudicada e para forçar esse processo, são aplicados produtos químicos para floculação e precipitação do resíduo descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Produtos para floculação e precipitação

Produtos químicos utilizados
Suspensão de Hidróxido de Cálcio
Ácido Clorídrico Carbocloro
Cloreto de Polialumínio
Hidróxido de Sódio
Poliacrilamida Aniônica

Fonte: Empresa parceira.

3.1.2 Análise de precipitação das partículas de silício e da massa de silício presente na água residuária

Para avaliar a dificuldade em se obter a precipitação natural das partículas de silício da água residuária, teste de precipitação foi executado conforme mostrado na Figura 15 e os materiais relacionados na Tabela 7. A análise do processo de precipitação das partículas de silício em meio aquoso ocorreu visualmente por cinco dias em temperatura ambiente e sem a adição de compostos químicos (precipitação natural) (Figura 16). As amostras identificadas com a letra “A” referem-se à água lançada/coletada em corpo receptor/efluente (Figura 14 posição 3). As amostras identificadas com a letra “B” referem-se à água sem o tratamento de floculação lançada/coletada diretamente no tanque de monitoramento pré-tratamento (Figura 14 posição 1). Na empresa, o processo de remoção do pó de silício baseia-se na adição de compostos que geram partículas em grande volume na água enviada para tratamento interno. Esses compostos facilitam a precipitação do material particulado.

Figura 15 – Amostra de água residuária contendo silício



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Análise de precipitação do silício durante cinco dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Materiais utilizados:

Tabela 7 – Materiais utilizados na análise de precipitação

Material	Quantidade
Seringa descartável BD 10 mL	10
Suporte plástico para seringas	1
Água residuária sem tratamento	50 mL
Água residuária tratada	50 mL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- 5 seringas de 10 mL de capacidade contendo o mesmo volume de água residuária sem tratamento foram posicionadas na vertical para observação visual da precipitação.
- 5 seringas com 10 mL de capacidade contendo o mesmo volume de água residuária tratada foram posicionadas na vertical para observação visual da precipitação.

3.1.3 Caracterização das amostras de água e lodo residuário

Na análise da massa de silício em água residuária, foram coletadas amostras diretamente do tanque de monitoramento pré-tratamento (Figura 14 posição 1) do processo de descarte para comparação com água potável. Os materiais são relacionados na Tabela 8.

Materiais utilizados:

Tabela 8 – Materiais para análise da massa de lodo em água

Material	Quantidade
Recipientes plásticos com capacidade de 500 mL	2
Balança Digital capacidade 5 kg	1
Água residuária sem tratamento	500 mL
Água potável	500 mL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Foram utilizados dois frascos reagentes em polietileno graduado com capacidade de 500 mL cada e tara de 0,057 kg (Figura 17). Posteriormente, as amostras foram pesadas em uma balança digital para obtenção das respectivas massas e comparação da massa do material particulado com amostra de água potável.

Figura 17 – Comparação da massa de silício na água residuária com água potável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra técnica para se medir a massa de sólidos em meio líquido leva em consideração o efeito do empuxo exercido pela massa fluida sobre a massa sólida da solução. A força de empuxo, descrita pelo Princípio de Arquimedes (298 a.C. - 212 a.C.) é a força exercida sobre um corpo sólido em meio líquido. Esta força é

contrária ao peso do corpo e sua intensidade é igual ao peso da massa de líquido deslocada pelo volume imerso do corpo sólido (UFRGS, 2003). Para obtenção desses valores se aplica a Equação 1:

$$\rho_{A_{Si}} = \frac{\rho_{H_2O} m_{Si}}{m_{H_2O} - m_{H_2O+Si} + m_{Si}} \quad (1)$$

em que:

$\rho_{A_{Si}}$ é a densidade da solução com silício.

$\rho_{H_2O} = 1g/cm^3$ é a densidade padrão da água.

m_{Si} é a massa de silício dissolvida na solução.

m_{H_2O} é a massa de água que constitui a solução.

m_{H_2O+Si} é a massa total da solução.

3.1.3.1 Obtenção do percentual de umidade do lodo residuário

Para analisar o percentual de umidade, realizou-se o teste de secagem do lodo em dois equipamentos para sua determinação. A análise foi realizada no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – São Paulo).

Métodos utilizados:

- 546 gramas de lodo foram colocados em cuba de inox por sete dias à temperatura em torno de 90°C em estufa microprocessadora modelo Digital Timer Sterilifer.
- 5,12 gramas foram colocados por 30 minutos a 118°C em balança determinadora de umidade modelo Ohaus.

3.1.3.2 Determinação da composição química do lodo e da água residuária

Para analisar quais elementos químicos compõem o lodo residuário, realizou-se o teste de fluorescência de Raios X nas amostras. Os materiais estão descritos na Tabela 9. A análise foi realizada no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – São Paulo).

Materiais utilizados:

Tabela 9 – Materiais utilizados para determinar os elementos químicos do lodo

Material	Quantidade
Lodo residuário desidratado	1 kg
Corpos-de-prova produzidos com pó de silício prensado	2
Equipamento de fluorescência modelo Rx S2	1
Prensa hidráulica Shimadzu capacidade 120 kN	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Produção de corpos-de-prova com o pó extraído do lodo residuário de silício, prensado a 60 kN em prensa hidráulica Shimadzu.
- Dois corpos-de-prova foram inseridos no equipamento de fluorescência de Raios X modelo Ranger S2, Bruker.

Para determinação das concentrações de silício (Si), sódio (Na), alumínio (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe) e magnésio (Mg) na água residuária pré e pós-tratamento, foram realizados ensaios por *Inductively Coupled Plasma* - ICP e protocolos do *Ewing's Analytical Instrumentation Handbook*, (2005). Os materiais utilizados estão descritos na Tabela 10. A análise de metais por *Inductively Coupled Plasma* - *Atomic Emission Spectrometry* - ICP/AES - Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente, análise físico-química do potencial hidrogeniônico - pH e análises ecotoxicológicas, medindo a produção de micronúcleos em *Allium cepa* em efluente são importantes para se avaliar a mutagenicidade (SOUZA et al., 2013).

Materiais utilizados:

Tabela 10 – Determinação dos elementos químicos da água residuária

Material	Quantidade
Recipiente plástico com capacidade de 500 mL	2
Equipamento: <i>Inductively Coupled Plasma</i> (ICP)	1
Água residuária pré-tratamento	500 mL
Água residuária pós-tratamento	500 mL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Antes da coleta das amostras os recipientes foram lavados com as respectivas águas dos processos. As amostras de água foram coletadas diretamente no ponto de descarte (Figura 14 posições 1 e 3).
- Foram utilizados dois frascos reagentes em polietileno graduado com capacidade de 500 mL cada conforme identificados na Figura 18 e enviados para análise química de metais por ICP no Laboratório da empresa Falcão Bauer conforme Apêndices B e C. Sendo:

Amostra 1: Água residuária identificada como “processo de corte silício” pré-tratamento.

Amostra 2: Água para descarte em efluente pós-tratamento.

Figura 18 – Amostras de água residuária para análise de ICP



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Testes ecotoxicológicos com organismos do solo *Eisenia andrei* - (minhoca)

Para verificar a possibilidade de toxicidade do lodo residuário e o risco de contaminação ao meio ambiente, foram efetuados ensaios com organismos de solo denominado *Eisenia andrei* (minhocas) realizados no Laboratório de Ecotoxicologia da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC – Sorocaba). Na Tabela 11 estão relacionados os materiais utilizados nos testes.

Esses organismos são comumente empregados na análise de possível toxicidade aguda para resíduos originários de estações de tratamento de efluente -

ETE. A preparação do solo artificial seguiu as normas OECD 207¹⁷ (1984) adaptadas como proposto por Garcia (2004).

Materiais utilizados:

Tabela 11 – Materiais utilizados para os testes com organismos do solo

Material	Quantidade
Areia industrial	20 kg
Argila branca	2 kg
Pó de fibra de coco	1 kg
Potes plásticos 115x95 mm	24
Minhocas - <i>Eisenia andrei</i>	800
Carbonato de cálcio	1 kg
Água destilada	1 L
Estufa para secagem	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Foram utilizados para o preparo, 70% de areia industrial, lavada, peneirada e seca em estufa, 20% de argila branca e 10% de pó de fibra de coco. O potencial hidrogeniônico - pH foi ajustado para $6,0 \pm 0,5$ com carbonato de cálcio (CaCO_3) e a umidade foi ajustada com água destilada, em 50% da capacidade de retenção do solo. Para medir a capacidade de retenção do solo foi utilizada a metodologia como descrita por Lima et al., (2010).
- Cálculo da capacidade de retenção (CR):
 1. Pesagem de 20 gramas de preparação de solo;
 2. Colocar em conjunto de papel de filtro em funil de vidro;
 3. Colocar o conjunto com a preparação de solo sobre o frasco Erlenmeyer;
 4. Adicionar 100 mL de água;
 5. Cobrir, integralmente, o conjunto;
 6. Deixar em repouso em refrigeração por 24 horas.
 7. Calcular o percentual da capacidade de adsorção segundo a Equação 2:

¹⁷ OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development – Guideline For Testing of Chemicals 207 - Earthworm, Acute Toxicity Tests, 1984.

$$CR = \frac{(100 - W_p + W_i)}{dW_t} 100 \quad (2)$$

Sendo:

W_p a massa de água percolada (em gramas).

W_i o conteúdo de água (em gramas) existente na amostra (umidade inicial).

dW_t a massa seca do solo (massa seca em estufa a 105 - 110°C / 24 horas).

- Para conseguir a quantidade de água presente nas preparações de solo, procedeu-se como segue:
 1. Pesagem de 50 gramas das preparações de solo (solo artificial conjugado à amostra a ser testada);
 2. Secagem em estufa à temperatura entre 105 e 110°C, durante 24 horas;
 3. Resfriamento do material à temperatura ambiente e nova pesagem;
 4. Cálculo da umidade relativa do solo seguindo a Equação 3:

$$U = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \quad (3)$$

Sendo:

U a Umidade (%)

W_1 a massa do recipiente.

W_2 a massa do recipiente mais a do solo.

W_3 a massa do recipiente mais a do solo seco (após o período na estufa).

- Para os testes de toxicidade aguda, as *Eisenia andrei* tiveram sua massa mensurada e selecionadas, utilizando-se indivíduos de massas semelhantes (\cong 260 mg) e aclimatados em laboratório, em solo artificial, por 24 horas, à temperatura ambiente e sob fotoperíodo de 12 horas. Após a aclimação, foram colocados em recipientes de polipropileno, com capacidade para 1000 mL, com tampa perfurada e redondos, evitando-se o acúmulo de indivíduos nas bordas. Foram colocados 10 *Eisenia andrei* por pote, cada pote contendo 500 gramas de solo preparado (Figura 19), sendo os testes realizados em triplicata. Os grupos foram divididos como segue:

- Controle: 100% solo artificial;
- G25%: 75% de solo artificial mais 25% de lodo seco;
- G50%: 50% de solo artificial mais 50% de lodo seco;
- G75%: 25% de solo artificial mais 75% de lodo seco;
- G100%: 100% de lodo seco.

Figura 19 – Sequência da manipulação com *Eisenia andrei* - (minhocas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.5 Testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores aquáticos *Raphidoceles subcapitata* - (algas)

Os ensaios de toxicidade aquática crônica foram realizados com *Raphidoceles subcapitata* (algas), seguindo o protocolo de Lewis et al. (1992), Blaise et al. (2000), Santos et al. (2007), da *Environmental Protection Series – Method - EPS*, (2007) e Monteiro (2016) com modificações, e desenvolvidos no Laboratório de Ecotoxicologia da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC – Sorocaba).

As amostras analisadas foram constituídas por efluente pré e pós-tratamento interno do processo de corte da *wafer* de silício. Foram avaliadas quatro amostras, coletadas entre os meses de outubro de 2015 a maio de 2016. A metodologia com algas *Raphidoceles* teve o objetivo de identificar possível efeito tóxico de amostras ambientais no desenvolvimento e reprodução de algas verdes. Nas Tabelas 12, 13 e 14 estão descritos os materiais, soluções e equipamentos utilizados no experimento.

Materiais utilizados:

Tabela 12 – Materiais utilizados no teste com Algas

Reagentes	
Nome químico	Fórmula Molecular
Cloreto de Magnésio	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Cloreto de Cálcio	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$
Ácido Bórico	H_3BO_3
Cloreto de Manganês	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$
Cloreto de Zinco	$ZnCl_2$
Cloreto de Ferro	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$
Cloreto de Cobalto	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$
Molibdato de Sódio	$NaMoO_4 \cdot 2H_2O$
Cloreto de Cobre	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$
Ácido Etileno Diamino Tetracético	$Na_2EDTA \cdot 2H_2O$
Nitrato de Sódio	$NaNO_3$
Sulfato de Magnésio	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
Fosfato de Potássio	K_2HPO_4
Bicarbonato de Sódio	$NaHCO_3$
Ágar	$C_{14}H_{24}O_9$
Ósmio	OsO_4
Glutaraldeído	$C_5H_8O_2$
Etanol	C_2H_6O

Fonte: Adaptado de Blaise et al. (2000).

Tabela 13 – Solução: Água Tamponada ($NaHCO_3$ a 15 mg.L^{-1})

Solução	Reagente	Quantidade (mg/g)	Preparo
1	Bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$)	15,0	Dissolver e diluir a 1000 mL com *água processada
	Cloreto de Sódio ($NaCl$)	80	
	Cloreto de Potássio (KCl)	2	
	Fosfato Dissódico ($Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$)	2,17	Dissolver e diluir a 1000 mL com água processada
	Fosfato Monopotássico (KH_2PO_4)	0,2	

*Refere-se a solução que fornece pH ideal, em torno de 6,0, para manutenção do inóculo inicial

Fonte: Adaptado de Blaise et al. (2000).

Tabela 14 – Aparelhos utilizados nos testes

Material	Quantidade
Câmara de Neubauer	1
pHmetro	1
Balança	1
Centrífuga de Mesa	1
Vortex	1
Contador	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados para solução estoque de micronutrientes que trata do procedimento de ensaios em algas - *Algal Assay Procedure médium*. Segue:

- Solução 1: Cada reagente teve sua massa medida e adicionado ao frasco (Solução 1) na ordem apresentada nas Tabelas 15 e 16, tomando-se o cuidado de dissolver cada novo composto químico somente após completa dissolução do anterior.

Tabela 15 – Composição do meio micronutriente (Solução 1)

Solução	Reagente	Quantidade (mg/g)	Preparo
I	Cloreto de Magnésio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	6,08	
II	Cloreto de Cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	2,20	
III	Ácido Bórico (H_3BO_3)	92,80	
IV	Cloreto de Manganês ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	208,0	
V	Cloreto de Zinco (ZnCl_2)	1,64	Dissolver e diluir a 100 mL com água processada
VI	Cloreto de Ferro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	79,9	
VII	Cloreto de Cobalto ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0,714	Dissolver e diluir a 100 mL com água processada
VIII	Molibdato de Sódio ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	3,63	Dissolver e diluir a 100 mL com água processada
IX	Cloreto de Cobre ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0,006	Dissolver e diluir a 100 mL com água processada
X	Ácido Etileno Diamino Tetracético ($\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	150,0	

Fonte: Adaptado de Blaise et al. (2000).

- a) O frasco (balão volumétrico de 100 mL) foi etiquetado e recebeu 70 mL de água. Mediu-se 164 mg de cloreto de zinco (ZnCl_2), que foi transferido para o frasco. Em seguida, completou-se o volume para 100 mL com água. Com uma pipeta transferiu-se 1 mL de solução de cloreto de zinco para a solução do frasco 1 (Solução Micronutriente).
- b) O frasco (balão volumétrico de 100 mL) foi etiquetado e recebeu 70 mL de água. Mediu-se 71,4 mg de cloreto de cobalto ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), que foi transferido para o frasco. Depois, completou-se o volume para 100 mL de água. Com uma pipeta transferiu-se 1 mL de solução cloreto de cobalto para a solução do frasco 1 (Solução Micronutriente).
- c) O frasco (balão volumétrico de 100 mL) foi etiquetado e recebeu 70 mL de água. Mediu-se 363 mg de molibdato de sódio ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que foi transferido para o frasco. Em seguida, completou-se o volume para 100

mL de água. Com uma pipeta foi transferido 1 mL de solução de molibdato de sódio para a solução do frasco 1 (Solução Micronutriente).

- d) O frasco (balão volumétrico de 100 mL) foi etiquetado e recebeu 70 mL de água. Mediu-se 60 mg de cloreto de cobre ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que foi transferido para o frasco. Depois, completou-se o volume para 100 mL de água. Com uma pipeta foi transferido 1 mL de solução de cloreto de cobre para a solução do frasco 1 (Solução Micronutriente).

Depois de adicionados todos esses componentes ajustou-se o volume da solução 1 (Solução Micronutriente) para 500 mL com água.

Tabela 16 – Soluções macronutrientes para meio *Algal Assay Procedure medium*

Solução	Reagente	Quantidade (g)	Preparo
2	Nitrato de Sódio (NaNO_3)	25,5	Dissolver e diluir a 500 mL com água processada
3	Sulfato de Magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	14,7	Dissolver e diluir a 500 mL com água processada
4	Fosfato de Potássio (K_2HPO_4)	1,044	Dissolver e diluir a 500 mL com água processada
5	Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)	15,0	Dissolver e diluir a 500 mL com água processada

Fonte: Adaptado de Blaise et al. (2000).

A partir de uma cultura de algas de sete dias, foi preparado um inóculo com $2,56 \times 10^5$ células/mL. Cada amostra foi preparada com diluições seriadas do efluente a 25%, 50%, 75% e 100%. Em cada tubo de reação (triplicata para cada diluição) foram colocados 2,5 mL de cada diluição. Em cada um desses tubos com as amostras foram adicionados 100 μL do inóculo de algas de concentração conhecida.

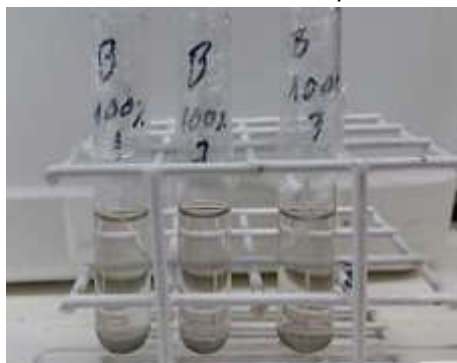
Na Figura 20, observam-se os tubos de ensaio com as diluições das amostras com o inóculo das algas com $2,56 \times 10^5$ células/mL e após 72 horas foi realizada a contagem de células em Câmara de Neubauer. As médias das contagens foram comparadas pelo teste estatístico Anova¹⁸, seguido pelo pós-teste Dunnett¹⁹, no programa Prisma 5.0, assumindo-se 0,5% como intervalo de confiança. A Anova

¹⁸ Anova é uma coleção de modelos estatísticos no qual a variância amostral é particionada em diversos componentes devido a diferentes fatores (variáveis), que nas aplicações estão associados a um processo, produto ou serviço. Fonte: <http://www.portallaction.com.br/anova>

¹⁹ O teste de Dunnett é um teste utilizado para comparar simultaneamente a média de tratamentos em teste com a média de um tratamento controle, considerando que as amostras são aleatórias e independentes, oriundas de variáveis com distribuições normais (BROCH, 2013).

(*Analysis of Variance*) é uma técnica de análise estatística que permite determinar a contribuição de cada fator para o resultado. É calculada a variância e o seu valor indica quanto estão afastados os valores obtidos do valor esperado (MAIA, 2013). A EC_{50}^{20} , que indica a capacidade de reduzir em 50% a reprodução das algas, foi calculada pela análise de regressão no programa Origin 4.0.

Figura 20 – Teste de toxicidade crônica com *Raphidocelis subcapitata* (Algas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Após a enumeração das algas na cultura de sete dias, em Câmara de Neubauer, uma diluição de células é preparada para conter, em cada frasco, uma concentração inicial de $2,56 \times 10^5$ células/mL. A solução de inóculo de alga deve ser preparada, tendo em mente que o volume final em cada frasco é 2,6 mL, como segue nas Equações 4 e 5:

$$\text{Fator de Diluição(FD)} = \frac{CC}{CFN \ 2,56 \ 10^5} \quad (4)$$

$$X = \frac{V}{FD} \quad (5)$$

onde:

FD é o Fator de Diluição.

CC é a Contagem da Concentração de células da cultura estoque (7dias).

CFN é a Concentração Final de Células ($2,56 \times 10^5$ células mL^{-1}).

X é o volume de cultura estoque em 2 mL de solução.

V é o volume da solução 2 mL.

²⁰ O EC_{50} de uma curva de dose-resposta “graduada” representa a concentração do composto para qual 50% do efeito é observado. Corresponde a concentração do fármaco que induz metade do efeito máximo. Fonte: <http://groups.molbiosci.northwestern.edu/holmgren/Glossary/Definitions/Def-E/EC50.html>

- Na transferência do inóculo da alga dos frascos para as condições de exposição, adicionou - se 100 μL de suspensão da alga em cada tubo de reação. A concentração inicial de algas foi de 1×10^4 células mL^{-1} . Cada tubo foi vedado com filme plástico e homogeneizado manualmente. Os tubos vedados foram incubados em sala de temperatura controlada por 72 horas a 24°C sob constante iluminação com lâmpadas fluorescentes frias e sob agitação constante em agitador magnético Biomixer modelo TS 2000 VDRL Shaker, o que assegura a troca gasosa e reduz a possibilidade de a alga se aderir à parede do frasco (Figura 21).

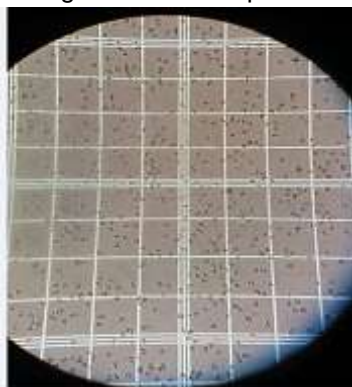
Figura 21 – Transferência do inóculo da alga para as condições de exposição



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Contagem com Câmara de Neubauer: primeiramente, limpou-se a câmara e a lamínula com papel apropriado. A lamínula foi colocada sobre a superfície de contagem antes de introduzir a amostra (suspensão de células) para contagem. A amostra foi introduzida em um dos dois canais em forma de V com uma micropipeta. A área sob a lamínula foi coberta pela amostra por capilaridade. Foi introduzido o líquido suficiente (10 - 15 μL) para que a superfície espelhada fosse coberta. A câmara foi colocada no microscópio com o foco no aumento em 400X conforme Figura 22.

Figura 22 – Contagem de células por microscopia óptica



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.6 Testes ecotoxicológicos com organismos bioindicadores superiores *Allium cepa* - (cebola)

Os testes utilizando *Allium cepa* (cebola) são realizados para determinar se há contaminação da água de efluente com potencial fitotóxico, genotóxico ou mutagênico. Trata-se de bioindicador comumente empregado para ensaios dessa natureza e segue protocolos específicos como proposto por Ma et al. (1985).

Em pesquisas, a utilização desse bioindicador teve como objetivo avaliar a mutagenicidade de águas de irrigação de hortaliças, numa região de mananciais da Grande São Paulo. Para isso foram feitos bioensaios utilizando raízes de *Allium cepa* para avaliar os Índices de Aberrações Cromossômicas - IAC e o Índice de Micronúcleos - IMN em células do meristema e da porção de F1 das raízes. Para essas pesquisas, Lacerda et al. (2011) utilizaram o protocolo proposto por Ma et al. (1995) com modificações e seguiu as etapas: germinação do bulbo, coleta da raiz, fixação em Carnoy, hidrólise das raízes em HCl 1N, 15° a 60°C, repouso na solução de Base de Shiff, fixação em Carnoy, montagem da região meristemática e da região F1 da raiz em lâmina com Carmim e leitura das lâminas em microscópio óptico.

No teste com água residuária contendo silício, sementes de *Allium cepa* ($2n = 16$ cromossomos) de um mesmo lote e da mesma variedade (*Baía Periforme*) foi o material biológico utilizado neste estudo, para avaliação dos efeitos tóxicos do efluente. Os materiais utilizados estão descritos na Tabela 17 e o termo $2n$ indica a divisão dos cromossomos em pares. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ecotoxicologia da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC – Sorocaba) entre os meses de novembro de 2015 a maio de 2016.

Materiais utilizados:

Tabela 17 – Materiais utilizados para os testes com *Allium cepa*

Material e Reagentes
Água purificada
Álcool 70%
Carnoy
Etanol
Ácido acético
Extrato de resveratrol
Ácido clorídrico HCl 1N
Trifluralina, 0,84 ppm
Reativo de Schiff
Carmin acético 2%
Sementes de <i>Allium cepa</i> (cebola)
Placas de petri
Papel filtro
Formol
Água residuária (pré-tratamento)
Água residuária (pós-tratamento)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Sementes de *Allium cepa* foram submetidas à germinação, em placas de petri, com papel de filtro embebido em 2 mL de água purificada (controle negativo), formol a 3% (controle positivo); efluente pré-tratamento e efluente pós-tratamento a 25°C, até que as raízes atingissem, aproximadamente, 1,5 centímetros de comprimento. Após cinco dias, o índice de germinação foi calculado em porcentagem. O índice de germinação das sementes de *Allium cepa* foi calculado segundo a Equação 6:

$$IG = \frac{N_{RG}}{N_{RNG}} 100 \quad (6)$$

onde:

IG é o índice de germinação (em porcentagem).

N_{RG} é o número de raízes germinadas.

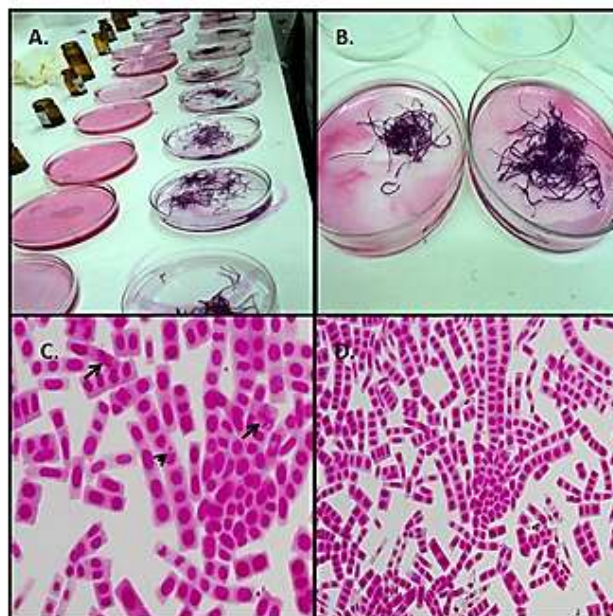
N_{RNG} é o número de raízes não germinadas.

- Após esse procedimento as raízes foram colocadas em frascos contendo Carnoy (três partes de etanol para uma de ácido acético – diluição volume

a volume – v/v). Depois de 24 horas, as raízes permaneceram em água destilada para recuperação por mais 24 horas e, novamente, fixadas em Carnoy e armazenadas em refrigeração, até a confecção das lâminas. Todos os ensaios foram realizados, simultaneamente e em duplicatas.

- Os meristemas radiculares, previamente fixados, foram lavados em água destilada por cinco minutos e hidrolisados em ácido clorídrico (HCl) 1N a 60°C por 10 minutos. Após nova lavagem em água destilada, as raízes foram submetidas ao reativo de Schiff por, aproximadamente, duas horas, em ausência de luz. Com os meristemas corados e lavados em água corrente, foram confeccionadas cinco lâminas de cada tratamento, para a avaliação de possíveis presenças de aberrações cromossômicas e micronúcleos, levando-se em conta a porcentagem de ocorrência de cada uma delas. A montagem das lâminas utilizou um fragmento da porção que foi macerado entre lâmina e lamínula com uma gota de carmim acético, além da região meristemática.
- Em cada lâmina foram analisadas 500 células da região meristemática. Quando esse número foi excedido, o valor foi normatizado, matematicamente, para 500 células, totalizando exatas 5000 células por tratamento. A observação foi feita em microscopia de luz, sob o aumento de 400X conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Bioensaio com *Allium cepa* (cebola)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Índice de Micronúcleos - IMN foi determinado utilizando-se o método de contagem descrito acima e a análise estatística para comparação dos grupos foi realizada pelo teste estatístico Anova, seguido pelo pós-teste de Dunnett, no programa Prisma 5.0.

Na Figura 23, em A e B são mostradas as raízes submetidas à coloração com Schiff; em C imagem microscópica das células, em que as setas apontam para uma figura de mitose (direita) e célula com IMN (esquerda) aumento 400X; em D. imagem microscópica das células meristemáticas, aumento 200X.

3.1.7 Ensaios dos corpos-de-prova produzidos com argamassa de concreto para evidenciar a aplicabilidade dos co-produtos na construção civil

Foram produzidos quatro lotes de corpos-de-prova denominados de A, B, C e D, composto por cinco amostras cada a fim de analisar a possibilidade do uso dos co-produtos (água e lodo residuários com silício) como material agregado para a produção de telhas de concreto.

Cada corpo-de-prova mede 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura. Em relação à produção dos corpos-de-prova para a argamassa um dos usos dos corpos-de prova de diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm é referente aos ensaios de resistência à compressão para o controle de qualidade do cimento Portland (cimento: areia normal padrão IPT - NBR-7215/96) (HAMASSAK et al., 2013).

A metodologia deste estudo é essencialmente empírica e, quando necessário, orientada pelas normas ABNT NBR 7215/96 relacionada à determinação da resistência à compressão, a norma ABNT NBR 5739/07 relacionada ao ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos e a norma ABNT NBR 5738/03 relacionada ao procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova. Os ensaios foram com o F_{cj} que se refere à resistência à compressão do concreto prevista para a idade de “j” dias, em MPa (ARAUJO, 2009).

O experimento durou sete dias e foi executado no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – São Paulo).

Cada lote foi produzido com diferentes traços (mistura) dos constituintes padrão para se obter a resistência à compressão dos corpos-de-prova (Figura 24).

Os traços indicam a formulação ou quantidade de cada insumo e a proporção em massa. Na Tabela 18 e Figura 25, são apresentados os materiais utilizados para produção dos corpos-de-prova.

Figura 24 – Lotes dos corpos-de-prova para testes de compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Materiais utilizados:

Tabela 18 – Materiais utilizados para produção dos corpos-de-prova

Material	Quantidade
Cimento CII E 32 (embalagem com 25 kg)	1
Areia média lavada (embalagem com 10 kg)	1
Água potável	1 L
Lodo residuário de silício	1 kg
Água residuária com silício	1 L
Forma cilíndrica para moldagem	20
Pote plástico	5
Balança digital (capacidade 5 kg)	1
Máquina para ensaios mecânicos de compressão (modelo EMIC DL-10000, capacidade máxima de 100 kN)	1
Recipiente plástico (capacidade 5 L para imersão)	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Materiais utilizados na produção dos corpos-de-prova de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Produção dos corpos-de-prova: sabe-se que a massa padrão de uma telha é de aproximadamente 4,7 kg com os respectivos traços: 1 kg de cimento; 3,5 kg de areia e 0,3 kg de água (ABNT NBR 13858-2/97). Por regra de três simples chegou-se às seguintes proporções em massa, respectivamente aos traços supracitados: 20,83% (cimento), 72,92% (areia), 6,25% (água), conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Composição padrão de uma telha em %

Traços	%
Areia	72,92
Cimento	20,83
Água	6,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para um corpo-de-prova (massa de 376 gramas) do lote “A”, adotando-se as proporções em massa dos constituintes padrão de uma telha, mostrados acima, as proporções em massa para cada corpo-de-prova são: 78,32 gramas de cimento, 274,18 gramas de areia e 23,5 gramas de água. Considerando-se que o lote é composto por um conjunto de cinco amostras, no total utilizou-se, aproximadamente, 0,392 kg de cimento, 1,371 kg de areia e 0,117 kg de água potável conforme Tabela 20. As proporções em massa de cada constituinte referem-se a lotes compostos, cada um, por cinco corpos-de-prova que foram produzidos em 27 de fevereiro de 2016, sendo o Fcj de sete dias para todos os lotes da Tabela 21.

Tabela 20 – Traços de um conjunto de corpo-de-prova para cada lote

Proporção em massa para corpo de prova (Lote A)	gramas	Proporção em massa para corpo de prova (Lote C)	gramas
Areia	274,18	Areia	137
Cimento	78,32	Cimento	78,32
Água	23,5	Lodo residuário	137
Proporção em massa para corpo de prova (Lote B)	gramas	Proporção em massa para corpo de prova (Lote D)	gramas
Areia	274,18	Areia	219,34
Cimento	78,32	Cimento	78,32
Água residuária	23,5	Água potável	23,5
		Lodo residuário	54,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas massas totais de cada corpo-de-prova de cada um dos lotes obtém-se, via média aritmética simples, a massa de 370,12 gramas para um corpo-de-prova representativo dos lotes A, B, C e D.

Tabela 21 – Traços de cada lote de corpos-de-prova

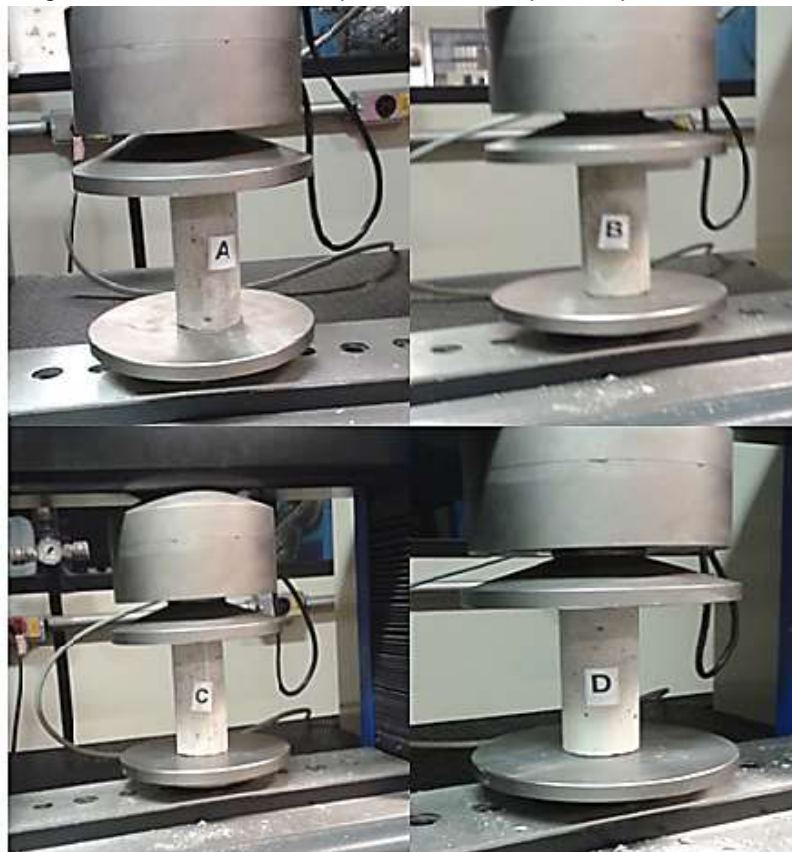
Corpos-de-Prova Lote (A)		Corpos-de-Prova Lote (C)	
Materiais	Quantidade	Materiais	Quantidade
Areia	1,371 kg	Areia	0,685 kg
Cimento	0,392 kg	Cimento	0,392 kg
Água potável	0,117 kg	Lodo Residuário	0,685 kg
Corpos-de-Prova Lote (B)		Corpos-de-Prova Lote (D)	
Materiais	Quantidade	Materiais	Quantidade
Areia	1,371 kg	Areia	1,097 kg
Cimento	0,392 kg	Cimento	0,392 kg
Água Residuária	0,117 kg	Lodo Residuário	0,274 kg
		Água potável	0,117 kg

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Teste de absorção de água dos corpos-de-prova: após a desmoldagem dos corpos-de-prova dos lotes A e B, foram imersos em recipiente plástico contendo 5000 mL de água potável por 24 horas para a obtenção da massa média úmida de cada lote das amostras. A não utilização das amostras dos lotes C e D nos testes de absorção é justificada no capítulo quatro dos resultados (item 4.1.10). Nessa análise foram medidos:
-

- Massa média pós-produção “massa seca”;
 - Massa média pós-imersão “massa úmida”; e,
 - Percentual de absorção de água.
- Ensaio de compressão dos corpos-de-prova: os testes de compressão foram realizados conforme norma ABNT NBR 5739/07 em março de 2016 no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais - LPCM da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – São Paulo). Os relatórios de ensaios estão nos Apêndices D, E, F e G. Os equipamentos utilizados para os testes foram: máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão, modelo EMIC DL-10000, capacidade máxima de 100 kN (Figura 26). Para a análise dos dados coletados nos ensaios de compressão foi utilizado o ambiente computacional MatLab® 2009, permitindo a interpretação gráfica dos referidos dados.

Figura 26 – Ensaio de compressão dos corpos-de-prova em lotes



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.8 Produção de protótipos telhas de concreto com lodo e água residuária contendo partículas de silício

Para se avaliarem as propriedades dos co-produtos na produção de telhas de concreto, uma indústria de telhas concordou em colaborar com os testes e pelos critérios de confidencialidade, permitiu a produção de protótipos de telhas utilizando os resíduos em estudo.

Essa indústria está localizada a 30 quilômetros da empresa parceira de semicondutores e produz aproximadamente 61000 telhas de concreto/mês, consome 20 m³ de água/mês e produz as telhas conforme a norma ABNT NBR 13858-2.

Foram produzidas 32 telhas – protótipo – seguindo a formulação para a produção de telhas de concreto (Figura 27). Sendo:

- 16 telhas produzidas com água residuária; e,
- 16 telhas produzidas com lodo residuário.

Os materiais utilizados na produção das telhas estão descritos na Tabela 22.

Figura 27 – Telhas produzidas com os resíduos (água e lodo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Materiais utilizados:

Tabela 22 – Materiais e equipamentos utilizados para produção de 32 telhas

Material	Quantidade
Areia lavada	112 kg
Cimento	32 kg
Água potável	4,8 kg
Água residuária	4,8 kg
Lodo residuário	2 kg
Balança Digital (capacidade 15 kg)	1
Silo de areia	1
Silo dosador com balança	1
Misturador de insumos	1
Dosador de massa	1
Extrusora	1
Rebarbador	1
Gaiolas/prateleira	1
Estufa	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Métodos utilizados:

- Na produção de 16 telhas foi mantida a formulação padrão, porém com a substituição de água potável pela água residuária;
- Em outras 16 telhas foram mantidas a formulação padrão, porém houve adição de 0,130 kg de lodo à massa. Nesse cálculo levou-se em conta a capacidade atual de produção da empresa de telhas de $\cong 61000$ peças/mês e quantidade de lodo gerado pela indústria de semicondutor de $\cong 8000$ kg/mês.

Na Equação 7, tem-se aproximadamente a quantidade de telhas produzidas com a quantidade de lodo gerado pela empresa parceira.

$$Q = \frac{P_x}{m_{lodo}} \quad (7)$$

onde:

Q é a quantidade de telhas com lodo.

P_x é a produção de lodo (nesse caso $\cong 8000$ kg/mês).

m_{lodo} é a massa de lodo por telha (0,130 kg/telha).

Dessa forma:

$$Q = \frac{8000\text{kg/mês}}{0,130\text{kg/telha}} \cong 61538 \text{ telhas/mês}$$

- Ensaio pós-produção das telhas: após o período de cura por sete dias, as telhas foram pesadas para análise de massa seca para se comparar com a massa de uma telha padrão de mercado. No que se refere ao ensaio de absorção, a norma ABNT NBR 13858-2 especifica um limite máximo de 10% em massa para absorção de água da telha de concreto, porém, dependendo do nível de controle do fabricante, é possível a obtenção do produto com até 3% de absorção. Essa baixa absorção faz com que a telha não sobrecarregue a estrutura do telhado e nem diminua sua resistência quando da ação da chuva (FERNANDES, 2012).
- Após 40 dias da produção, as telhas foram novamente pesadas e comparadas à massa seca de uma telha padrão de mercado o que é mostrado na Tabela 23. Nessa análise, as telhas foram submetidas a teste de absorção de água por 24 horas para obtenção dos valores em massa úmida após a imersão.

Tabela 23 – Teste de absorção de água das telhas por 24 horas

Amostras	Massa Seca	Massa Úmida
Telha com água residuária	4,655 kg	4,850 kg
Telha com lodo residuário	4,365 kg	4,575 kg
Telha padrão de mercado	4,715 kg	4,910 kg

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.9 Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com os co-produtos

Para se avaliar a resistência à flexão das telhas, estas foram identificadas em lotes com as letras “A” e “B” (Figura 28), em que “A” indica telha produzida com lodo residuário e “B” indica telha produzida com água residuária.

Figura 28 – Separação dos lotes para os ensaios de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada lote foi composto por seis peças e as telhas foram encaminhadas para ensaios ao Laboratório da Falcão Bauer para determinação da carga de ruptura pelo método de ensaio de flexão de acordo com a norma ABNT NBR 13858-2/97 item D. Os relatórios dos ensaios estão no Apêndice H. As telhas produzidas contemplam os requisitos das classes do perfil e a telha se enquadra na classe B, profundidade do perfil $40 \leq d < 50$ milímetros e carga de ruptura à flexão $\geq 2400N$ conforme especificação da norma ABNT NBR 13858-2.

O desenvolvimento empírico do produto seguiu passos experimentais e verificações dando à descrição o caráter de documentação científica.

3.1.10 Análise de viabilidade econômica e de oportunidade de negócios entre os setores em estudo

Com o objetivo de se avaliar técnica e economicamente a utilização dos co-produtos na indústria de telhas de concreto, sugere-se plano de melhoria contínua (PDCA) para reuso dos resíduos (água e lodo) como insumos para a indústria da construção civil, propondo-se possível simbiose industrial entre as empresas, e análise de viabilidade econômica dessa simbiose. Uma matriz denominada de análise SWOT (*Strengths; Weaknesses; Opportunities e Threats*) proposta por Kotler (2000), avaliou as forças; fraquezas; oportunidades e ameaças da matriz ao negócio, elaborada para identificar as oportunidades de negócio com a produção de telhas de concreto produzidas com água residuária e com lodo residuário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados

A seguir, apresentam-se os resultados das análises dos resíduos (água e lodo residuários), resultantes do tratamento de efluente da empresa de semicondutores englobando-se os testes de precipitação do material particulado, caracterização química das amostras de resíduos, dos percentuais de umidade do lodo, testes de toxicidade com bioindicadores *Eisenia andrei*, *Raphidoceles subcapitata* e *Allium cepa*, ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova, testes de absorção das amostras e à flexão dos protótipos “telhas”. Nas discussões apresentam-se as possibilidades de oportunidade de negócios para a empresa parceira quanto à destinação dos co-produtos (água e lodo).

4.1.1 Descrição dos resíduos (água e lodo) e dos processos de tratamento de efluente da empresa de semicondutores

Tratam-se de dois tipos de resíduos dentre os quais a água residuária oriunda do processo de corte das *wafers* é destinada ao processo de filtragem e adição de substâncias químicas, tornando-se parte em lodo residuário e a outra parte descartada em efluente interno e externo pela empresa de semicondutores.

4.1.2 Análise de precipitação das partículas de silício e da massa de silício presente na água residuária

A análise de precipitação do silício (Figura 16) indicou-o como uma substância muito fina, de difícil separação. Isso é consistente com a possibilidade das partículas em dispersão não precipitar nesse prazo, cinco dias.

No experimento, as amostras representadas como “A”, mais claras, referem-se à água coletada na estação de monitoramento (Figura 14 posição 3) pós-tratamento para o descarte em efluente. As amostras “B” são mais escuras devido às partículas de silício em suspensão e referem-se à água coletada na caixa de inspeção pré-tratamento de filtragem (Figura 14 posição 1) da empresa parceira.

Na análise de massa sólida presente na água residuária, após pesagem dos recipientes, foram obtidos os seguintes resultados:

- No recipiente 1, a massa de água potável em 500 mL foi de 0,500 kg, descontada a tara do recipiente, como esperado.
- No recipiente 2, a massa de água residuária em 500 mL foi de 0,503 kg, descontada a tara do recipiente.

Logo, a amostra com água residuária apresenta 0,003 kg ou 0,6% em massa de material particulado em suspensão para cada 500 mL. Considerando que a empresa trata 1300 m³ de água residuária por mês, nesse mesmo período, a quantidade de material particulado em suspensão descartado é de aproximadamente 7,8 toneladas/mês.

Na Tabela 24, apresenta-se o cálculo para a obtenção da quantidade de lodo em água residuária. Empiricamente, esse resultado corresponde com a informação da empresa parceira descartar próximo de 8 toneladas - lodo/mês, valor este que será a base para as projeções a serem desenvolvidas na seção 4.2 – Discussões. Devido ação do empuxo exercido pela parte líquida da solução sobre a massa de silício nela dissolvida, Tabela 24, obteve-se o valor aproximado de 0,005 kg ou 1% em massa de material particulado dissolvido na solução, o que não será considerado nas projeções.

Tabela 24 – Quantidade de partículas de silício na água residuária*

Métodos	Recipiente 1 massa de água em kg	Recipiente 2 massa de água residuária em kg	Diferença em massa em kg	Diferença de massa em %	Tratamento de água em m³	Quantidade de lodo gerado em kg
Proporção em massa	0,500	0,503	0,003	0,6	1300	7800
Proporção em massa mais efeito do empuxo	0,500	0,503	0,005	1,0	1300	13000

* Assume-se que 1 L de água potável contém massa de 1 kg

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Caracterização química das amostras de água e lodo residuário

A determinação das concentrações de elementos químicos por (ICP) - análise química de metais – resultou nos seguintes dados (Tabela 25):

Tabela 25 – Resultados da análise por ICP em água residuária

Parâmetros	(Amostra 1)	(Amostra 2)
Silício, mg/L	4,612	5,468
Sódio, mg/L	0,3056	486,85
Alumínio, mg/L	0,1095	55,495
Cálcio, mg/L	0,3933	1,6405
Ferro, mg/L	0,0906	0,0808
Magnésio, mg/L	0,0188	0,1156
As amostras foram filtradas conforme determinação da técnica		

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Amostra 1: refere-se à água residuária coletada diretamente no tanque de inspeção pré-tratamento sem a adição de elementos químicos para floculação e precipitação.
- Amostra 2: refere-se à água para descarte em efluente externo à empresa parceira, coletada diretamente na estação de tratamento de efluente pós-tratamento com a adição de elementos químicos utilizados para floculação e precipitação das partículas de silício.

As análises de fluorescência de Raios-X indicaram um percentual de óxido de alumínio nas amostras de lodo residuário (Tabela 26), supostamente resultante dos produtos empregados para floculação e precipitação do material particulado.

Tabela 26 – Teste de Fluorescência do lodo por Raios-X

Elementos		1º análise (% em massa)	2ª análise (% em massa)
Óxido de sódio	Na ₂ O	1,78	2,36
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	71,1	69,8
Óxido de silício	SiO ₂	24,4	24,1
Cloro	Cl	1,6	1,58
Óxido de cálcio	CaO	0,825	0,796
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	0,106	0
Óxido de magnésio	MgO	0	1,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se maior quantidade de óxido de alumínio por mililitro na água residuária, indicando a necessidade de aplicação dessa substância durante o processo de tratamento da água para precipitação do material particulado. Outra constatação foi o valor de 0,856 mg/L de silício descartado em efluente externo. Essa análise deu-se com base nos resultados da Tabela 25 referente ao teste de

caracterização química das amostras em que a amostra 1 foi de 4,612 mg/L de silício e a amostra 2, de 5,468 mg/L de silício. A afirmação de concentração de silício nas Tabelas 25 e 26 indicam a diferença de sólidos dissolvidos e totais. Portanto, há uma quantidade expressiva de sílica na forma solúvel.

4.1.4 Obtenção do percentual de umidade do lodo residuário

Nos testes de secagem do lodo, utilizando-se dois métodos (estufa e balança determinadora de umidade), observou-se o elevado teor de umidade de 92% desse material, conforme Tabelas 27 a e b. De acordo com a literatura, esse resultado pode interferir na composição dos traços para produção de telhas de concreto impactando na homogeneização da argamassa, o que não atende ao ponto de extrusão da telha.

Tabela 27 (a) – Secagem do lodo em estufa

Secagem do Lodo Residuário (Si)	Umidade (%)
Massa líquida úmida = 0,546 kg Massa líquida seca = 0,041 kg	92,50%

Tabela 27 (b) – Secagem do lodo em balança determinadora de umidade

Secagem do Lodo Residuário (Si)	Umidade (%)
Massa líquida úmida = 5,120 g Massa líquida seca = 0,395 g	92,30%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.5 Testes ecotoxicológicos com organismos do solo *Eisenia andrei* (minhoca)

Nos testes de toxicidade aguda com *Eisenia andrei*, para verificação de alterações no comportamento ou na mobilidade desses organismos após 7 a 14 dias do início do experimento, foram retirados os organismos dos solos de teste com as seguintes proporções:

- 75% de solo artificial mais 25% de lodo seco;
- 50% de solo artificial mais 50% de lodo seco;
- 25% de solo artificial mais 75% de lodo seco;
- 100% de lodo seco.

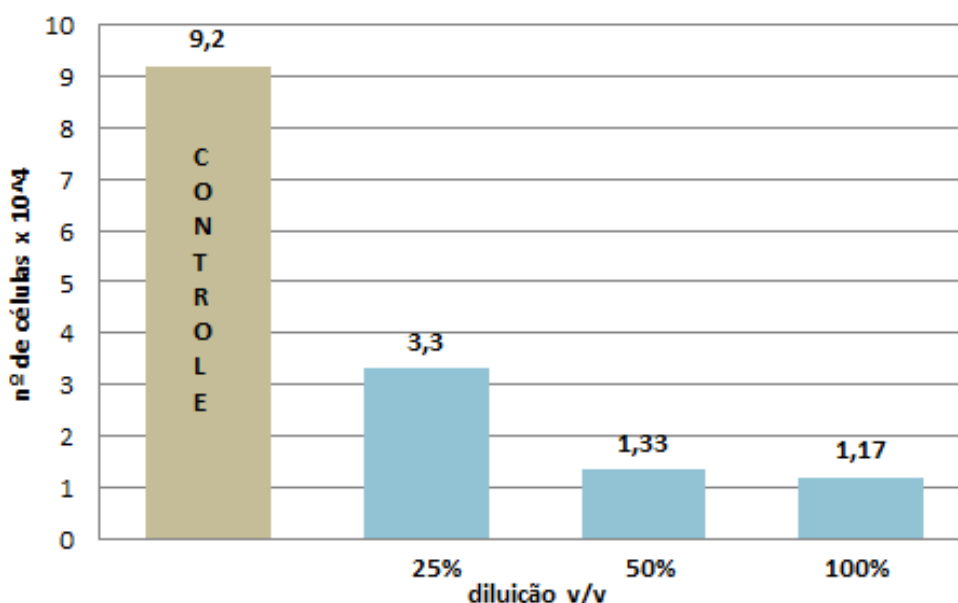
Verificou-se a reação a estímulos mecânicos na parte frontal dos indivíduos e não foi observada mortalidade de nenhum dos indivíduos nas concentrações utilizadas, indicando ausência de toxicidade aguda do co-produto para esses organismos em 14 dias.

4.1.6 Testes *Raphidocelis subcapitata* ecotoxicológicos com organismos aquáticos (algas)

O ensaio de toxicidade aquática com o bioindicador *Raphidocelis subcapitata*, exposto ao efluente pós-tratamento, mostrou inibição do crescimento algal, proporcional à concentração de efluente na água. Na Figura 29 (A), observa-se o crescimento da população algal em biomassa exposta ao efluente em relação ao controle onde foram obtidos os valores de $9,2 \times 10^4$, $3,3 \times 10^4$, $1,33 \times 10^4$ e $1,17 \times 10^4$ células/mL, respectivamente, para controle de efluente a 25%, 50% e 100% em água diluição volume a volume (v/v).

O grupo controle não teve adição de silício e nele as algas tiveram mais crescimento. Conforme feita adição de água residuária com silício na solução contendo algas, possivelmente a inibição do crescimento algal se deu devido à formação de uma barreira à passagem de luz, que dificultou o processo de fotossíntese das algas.

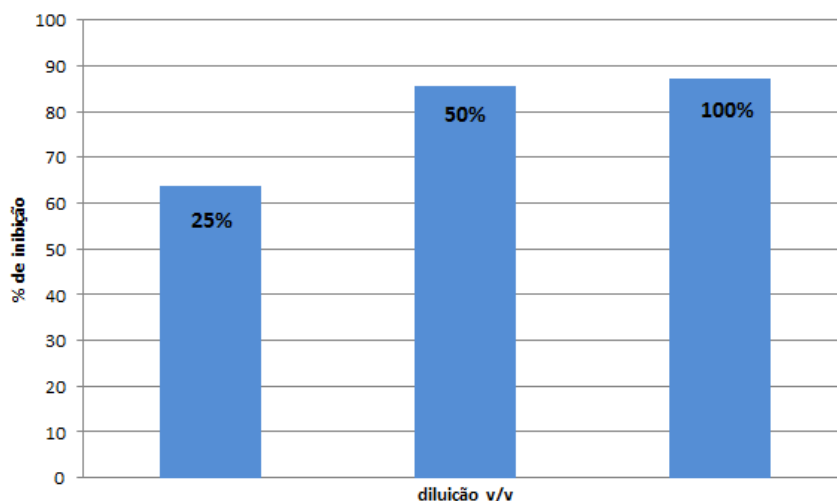
Figura 29 (A) – Relação do crescimento da população algal em relação ao controle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 (B), observa-se a inibição do crescimento algal em porcentagem 63,8%, 85,5% e 87,3%, respectivamente para o efluente a 25%, 50% e 100%. O mesmo ensaio realizado com o efluente pré-tratamento resultou em 100% de inibição em todas as concentrações, indicando a possibilidade da retenção de luz devido a partículas de silício em suspensão.

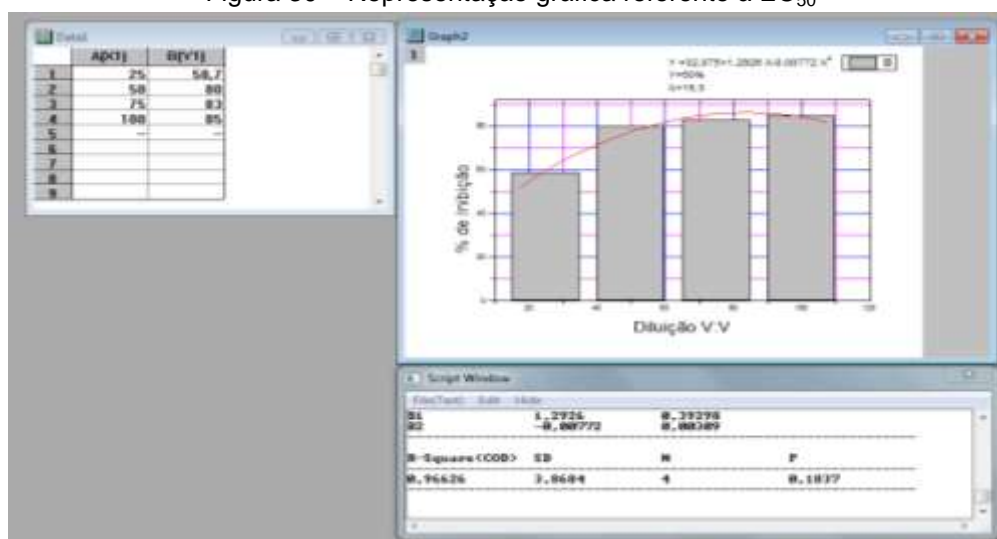
Figura 29 (B) – Taxa de inibição do crescimento algal em porcentagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30, referente à representação gráfica de análise a EC_{50} , que indica a capacidade de reprodução das algas calculada pela análise de regressão e na concentração do composto correspondente que induz o efeito, constatou-se 15,3% de inibição algal.

Figura 30 – Representação gráfica referente à EC_{50}



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, supõe-se que as algas não se desenvolveram devido à formação de barreira à passagem de luz ao meio aquático pelas partículas em suspensão na superfície livre da água, comprometendo o processo de fotossíntese algal. Não se observou comprometimento ou retardo do crescimento algal por toxicidade. Em outras palavras, o não crescimento das algas deu-se por restrições físicas e não químicas.

4.1.7 Testes ecotoxicológicos com organismos superiores *Allium cepa* (cebola)

O ensaio de mutagenicidade do efluente industrial, pré e pós-tratamento, no bioindicador *Allium cepa* para toxicidade crônica, pela quantificação de micronúcleos em células na região das raízes, apresentou as amostras em placas para os ensaios de toxicidade.

As análises de mutagenicidade dos respectivos efluentes não mostraram diferença significativa entre os grupos tratados (efluente pré e pós-tratamento), sendo o controle negativo para efeito mutagênico.

4.1.8 Ensaios com corpos-de-prova produzidos com argamassa de concreto para evidenciar a aplicabilidade dos co-produtos na construção civil

Ensaios realizados por Brejão (2012) trataram da mistura da água residuária com silício e da água pós-tratamento para produção de corpos-de-prova constituídos de argamassa de concreto com o objetivo de verificar sua aplicação como reforço estrutural em concreto. Os ensaios em laboratório de agregação do material particulado para aplicação como reforço estrutural indicaram ganho de resistência à compressão de aproximadamente 25%.

Os mesmos corpos-de-prova foram analisados através de espectroscopia Raman²¹ em que as partes escuras (Figura 31) correspondem às partículas de silício. Tais partículas têm aproximadamente de 1 a 5 micra, condizente com os

²¹ Raman - Trata-se de uma técnica que usa uma fonte monocromática de luz que, ao atingir um objeto, é espalhada por ele, gerando luz de mesma energia ou de energia diferente da incidente. No primeiro caso, o espalhamento é chamado de elástico e não é de interesse, mas no segundo (espalhamento inelástico) é possível obter muitas informações importantes sobre a composição química do objeto a partir dessa diferença de energia (FARIA, 2011).

estudos anteriores, que a dispersão foi caracterizada com partículas de silício dispersas e o seu tamanho foi determinado em ordem de grandeza de 5 micra (ARBUCIAS, 2002).

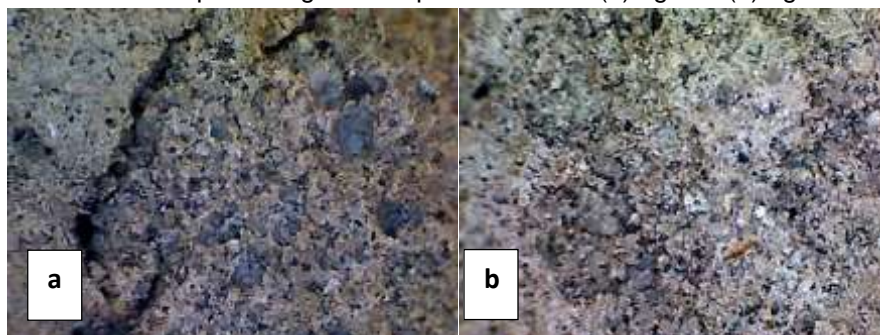
Figura 31 – Partículas de silício após secagem da água residuária



Fonte: Elaborado pelo autor.

A provável explicação para o comportamento obtido é a redução de interstícios na mistura da argamassa pela adição da água residuária com silício, que preencheu tais espaços. As imagens dos corpos-de-prova, obtidas por microscopia óptica são apresentadas na Figura 32 (a) e (b), onde (a) representa água potável e (b) água residuária com silício. De modo geral, a aparência é de um material mais compactado e com menor ocorrência de interstícios.

Figura 32 – Microscopia de argamassa produzida com (a) água e (b) água residuária



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo indicou a viabilidade do reaproveitamento do co-produto podendo-se estabelecer uma possibilidade de simbiose industrial entre os setores de semicondutores e da indústria da construção civil. O resultado dos ensaios foi compatível com o estudo de Lee e Liu (2009), em que o resíduo desidratado proveniente do tratamento de água da indústria da microeletrônica para substituir de 5 a 20% em peso do cimento Portland em argamassa de cimento possibilitou que a

resistência à compressão seja maior que a do cimento comum após três dias de cura. No caso da substituição de 10% em peso, a resistência à compressão aumentou de 25 a 35% após cura de 7 a 90 dias.

4.1.9 Aplicação dos resíduos na produção de corpos-de-prova para produção de telhas de concreto

Após o teste de compressão dos corpos-de-prova dos lotes A, B, C e D, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 28, de cada corpo-de-prova, que indicaram valores de resistência à compressão. Os valores de carga apresentados nas respectivas tabelas referem-se às cargas de ruptura das amostras. Ressaltam-se os componentes constituintes dos corpos-de-prova mencionados na Tabela 20:

- Lote A: areia, cimento e água potável (composição/traço padrão).
- Lote B: areia, cimento e água residuária.
- Lote C: areia; cimento e lodo residuário.
- Lote D: areia, cimento, água potável e lodo residuário.

Tabela 28 – Teste de compressão por lote

Corpo de prova Lote (A)	Carga Aplicada (N)	Fc _j	Tensão de Compressão* (MPa)	Corpo de prova Lote (B)	Carga Aplicada (N)	Fc _j	Tensão de Compressão (MPa)
1	22743,97	7 dias	11,4	1	18510,09	7 dias	9,28
2	19063,58	7 dias	9,56	2	23036,62	7 dias	11,55
3	23084,33	7 dias	11,57	3	12816,15	7 dias	6,42
4	23577,38	7 dias	11,82	4	15011,02	7 dias	7,52
5	21630,63	7 dias	10,84	5	14654,75	7 dias	7,35
Corpo de prova Lote (C)	Carga Aplicada (N)	Fc _j	Tensão de Compressão (MPa)	Corpo de prova Lote (D)	Carga Aplicada (N)	Fc _j	Tensão de Compressão (MPa)
1	6457,38	7 dias	3,24	1	9189,83	7 dias	4,61
2	4507,44	7 dias	2,26	2	10166,39	7 dias	5,10
3	5818	7 dias	2,92	3	12319,91	7 dias	6,18
4	8413,68	7 dias	4,22	4	9698,79	7 dias	4,86
5	8525,01	7 dias	4,27	5	11540,58	7 dias	5,78

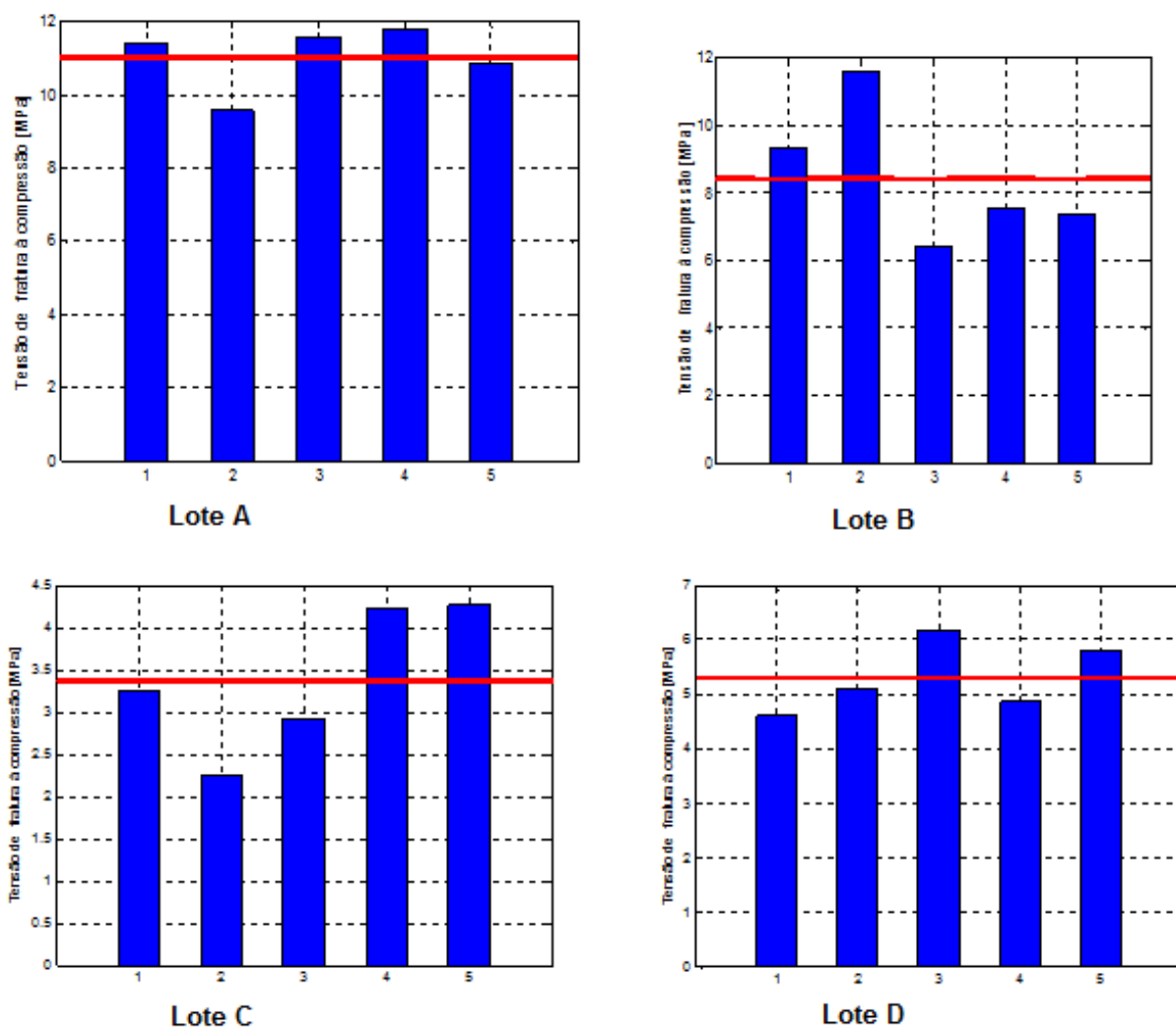
*Valores obtidos para área de seção reta padrão dos corpos-de-prova (A = 19,95 cm²)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 33, apresenta-se o valor de tensão de ruptura à compressão, em MPa (Mega Pascal), para as cinco amostras de cada lote (A, B, C e D) estudados. Em cada figura, a linha vermelha aponta o valor médio de tensão de ruptura à compressão para cada lote. Os picos de resistência à compressão em MPa, para cada corpo-de-prova, foram:

- Lote A: Corpo-de-prova 4 = 11,82 MPa.
- Lote B: Corpo-de-prova 2 = 11,55 MPa.
- Lote C: Corpo-de-prova 5 = 4,27 MPa.
- Lote D: Corpo-de-prova 3 = 6,18 MPa.

Figura 33 – Resistência à compressão em MPa dos corpos-de-prova



Linhas verticais indicam a tensão de fratura à compressão em MPa

Linhas horizontais indicam a série dos corpos-de-prova

Fonte: Elaborado pelo autor.

O lote A (composição padrão) apresenta maior valor médio de tensão de ruptura à compressão entre o grupo de lotes A, B, C e D. As amostras do lote B apresentam média de tensão de ruptura à compressão mais próxima da verificada no lote A, o que confirma a possibilidade de aplicação da mistura empregada em B para a produção de telhas.

Para efeito de interpretação dos resultados obtidos na Tabela 28, nos testes de compressão foi utilizado o fator de conversão entre unidades de pressão de 1 MPa \cong 10,1972 kgf/cm².

Mesmo que empírico, estatisticamente o teste de compressão nos corpos-de-prova pode indicar aquele que mais se aproxima à composição padrão do lote referência. Toda a área de estatística se baseia na pedra fundamental do conceito de variável aleatória. É uma função que depende da média, da dispersão, da assimetria e de várias outras características que, juntas, geram realizações de dados observados. Igualmente importante com as medidas de tendência central são as medidas de dispersão, representando como os dados se espalham ao redor da média. Quando os números são sempre próximos à média, isso significa que a tendência central representa bem os dados (SAMOHYL, 2009).

Na Tabela 29, com base nos valores obtidos pelo desvio padrão e da média das tensões máximas de compressão, em MPa, obtidas em cada lote dos corpos-de-prova, obteve-se o coeficiente de variação (CV) que, segundo Reis (2010), é uma medida de dispersão relativa, pois permite comparar a dispersão de diferentes distribuições (com diferentes médias e desvios padrões). De acordo com esse autor, pode-se calcular o (CV) de uma série de amostras pela Equação 8:

$$CV\% = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (8)$$

Onde \bar{x} é a média e S é o desvio padrão do conjunto de dados. Quanto menor o valor do CV% mais os dados estão concentrados em torno da média (conjunto mais homogêneo).

Neste estudo, \bar{x} é a média das tensões de ruptura à compressão dos corpos-de-prova de cada lote, em MPa, e S é o desvio padrão da respectiva média \bar{x} para cada lote, em MPa.

Tabela 29 – Determinação do coeficiente de variação dos lotes de corpos-de-prova

Lotes	Desvio padrão de cada lote (MPa)	Média das tensões de ruptura à compressão dos corpos-de-prova (MPa)	Coeficiente de variação (%)
A	0,90	11,04	8,15
B	2,03	8,42	24,11
C	0,86	3,38	25,55
D	0,65	5,31	12,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 34, apresenta-se a resistência à compressão dos corpos-de-prova de cada lote com coeficiente de variação (CV%) associado ao desvio padrão da média das tensões de cada um dos lotes, aplicando-se os resultados obtidos na Tabela 29. Por meio dessa, a amostra dois do lote B está na faixa aceitável de resistência à compressão em comparação com as amostras do lote A (lote de referência – composição química padrão). Nas amostras do lote D pode-se inferir maior homogeneização da mistura devido menor dispersão dos dados que constituem a referente série. O fato de o lodo ser bom homogeneizador pode explicar a diferença na aparência das telhas de concreto.

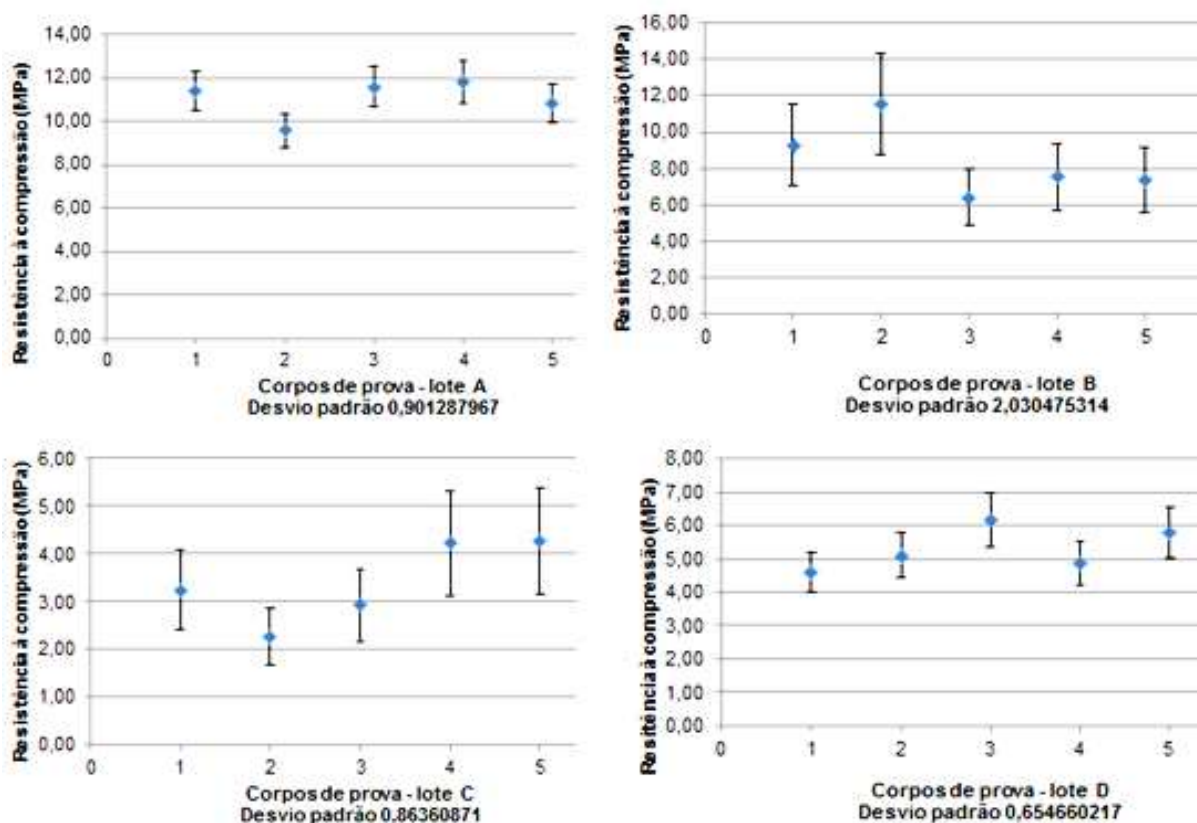
No lote C, os valores de tensão à compressão dos corpos-de-prova apresentam-se mais dispersos em comparação com o lote de referência A. Sugere-se que a causa desse fenômeno foi a não utilização de água na constituição química das amostras, que possibilitaria maior homogeneização da mistura. Nesse lote, a integração de seus constituintes químicos deu-se apenas mediante a umidade intrínseca ao próprio lodo não havendo, por hipótese, semelhante agregação da mistura como observado no lote A.

As amostras do lote B, contendo água residuária em sua constituição, apresentaram maior resistência à compressão em comparação com as amostras dos lotes C e D, em que se utilizou lodo residuário. Devido às partículas de silício diluídas na água residuária, houve maior preenchimento dos interstícios estruturais das amostras do lote B.

As barras de erros nos gráficos dos lotes de A a D foram determinadas via coeficiente de variação do desvio padrão da média em tensão à compressão da série de medidas para cada lote. O coeficiente de variação é determinado pela razão entre o desvio padrão da média de dados da série pela média da mesma série. Com

base nessas informações, os lotes A e D apresentam baixo grau de dispersão, enquanto os lotes B e C apresentam maior grau de dispersão.

Figura 34 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de cada lote com coeficiente de variação (%) associado ao desvio padrão da média das tensões



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos valores correspondentes ao pico de resistência de tensão de ruptura à compressão, em MPa, considere a Equação 9 para o cálculo da área projetada de uma telha:

$$A_p = bl \quad (9)$$

onde:

A_p é a área projetada da telha.

b é a largura da telha.

l é o comprimento da telha.

Pode-se determinar a pressão suportada por uma telha ao teste de compressão, em kgf/cm² pela Equação 10:

$$P = \bar{M}f \quad (10)$$

onde:

P é a pressão média suportada, em kgf/cm².

\bar{M} é a média das medidas de pressão, em MPa.

$f = 10,1972$ é o fator de conversão de MPa para kgf/cm².

Aplicando a Equação 10 para os quatro lotes, obtêm-se os valores de máxima resistência à compressão dos corpos-de-prova para cada lote:

➤ Lote A: $P = 11,82 \times 10,1972 \cong 120,53 \text{ kgf/cm}^2$	}	Diferença de 2%
➤ Lote B: $P = 11,55 \times 10,1972 \cong 117,77 \text{ kgf/cm}^2$		
➤ Lote C: $P = 4,27 \times 10,1972 \cong 43,54 \text{ kgf/cm}^2$	}	Baixa resistência mecânica à compressão
➤ Lote D: $P = 6,18 \times 10,1972 \cong 63,02 \text{ kgf/cm}^2$		

Considera-se um resultado importante o fato de o lote B, composto por água residuária estar aproximadamente 2% abaixo do valor de resistência do lote A, que seguiu a composição/traço padrão de uma telha de concreto.

4.1.10 Teste de absorção de água dos corpos-de-prova

Na Tabela 30, é apresentado o resultado da absorção de água pelos corpos-de-prova dos lotes A e B e também a sua variação em massa após o período de imersão. Mesmo que empírico, o teste teve como objetivo verificar a influência da alteração das proporções em massa dos constituintes das telhas com a adição de água residuária e o impacto dessa alteração química na capacidade de absorção de água das amostras.

Os corpos-de-prova foram imersos em água potável por 24 horas, por meio do que foi obtida a massa média úmida dos mesmos.

Tabela 30 – Análise de absorção de água e de massa dos corpos-de-prova

Lote	Massa média pós-produção (kg)	Massa média pós-imersão (kg)	Absorção de água (%)
A	0,376	0,376	Zero
B	0,376	0,378	\cong 0,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas amostras do lote A (composição padrão industrial das telhas de concreto) não houve absorção de água por seu material constituinte. Nas amostras do lote B (em que se fez uso da água residuária) houve aumento 0,5% em massa pela absorção de água no período de imersão. As amostras dos lotes C e D foram descartadas porque apresentaram resistência mecânica à compressão muito inferior à resistência mecânica do lote A (constituição padrão), ao contrário do que se observou nas amostras do lote B, que apresentaram resistência à compressão próxima as amostras do lote A. Com essa análise, conclui-se que a adição de água residuária à massa não compromete sua homogeneização, pois conforme a ABNT NBR 13858-2, a absorção de água deve ser menor ou igual a 10%. Como o silício impacta na homogeneização da massa, mesmo que tratando-se de teste empírico, propõe-se a continuidade desta análise.

4.1.11 Produção de protótipos telhas de concreto com lodo e água residuária contendo partículas de silício

Após o processo de cura das telhas, por amostragem, três telhas de cada lote tiveram suas massas medidas (Tabela 31) sendo obtidos os seguintes resultados:

Tabela 31 – Massa (em kg) das telhas após produção

Telha	Com água residuária	Com lodo residuário	Diferença em %
1	4,572	4,434	\cong 3
2	4,582	4,451	\cong 2,9
3	4,661	4,393	\cong 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores em massa das telhas produzidas com os co-produtos estão dentro dos parâmetros da norma em questão indicando que uma telha de concreto poderá ter massa média de 4,7 kg.

4.1.12 Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com lodo residuário

Nos ensaios de flexão, conforme norma ABNT NBR 13858-2 item D, as telhas produzidas com lodo residuário não atingiram a carga mínima de 2400 N (Newtons) ficando aproximadamente 6,6% em resistência à flexão abaixo do recomendado pela norma. Na Tabela 32, referente a telhas produzidas com o lodo residuário, são indicados os valores de ruptura à flexão de cada telha.

Avaliando-se o valor máximo em massa, um dado importante é que a telha produzida com lodo residuário ficou aproximadamente 6% (0,250kg) mais leve que a telha padrão de mercado. Com esse resultado pode-se concluir que se a telha é mais leve, os cálculos estruturais para o telhado poderão ser revistos implicando em economia estrutural em sua montagem.

Supõe-se que o excesso de umidade do lodo tenha alterado as propriedades dos traços da telha dificultando a homogeneização da massa que a constitui.

Tabela 32 – Ensaio de flexão - telhas produzidas com lodo residuário (Amostra A)

Telha nº		Carga de Ruptura à flexão (N)	
1		2251	
2		1942	
3		2008	
4		1956	
5		1927	
6		1905	
	Classe do Perfil	Profundidade do perfil (d) (mm)	Carga de Ruptura à Flexão (N)
Requisitos NBR 13858-2	A	d ≥	≥ 2400
	B	40 < d ≤ 50	
	C	30 < d ≤ 40	≥ 2000
	D	20 < d ≤ 30	
	Plana	d < 20	≥ 1200

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.13 Determinação da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto produzidas com água residuária

Para as telhas produzidas com água residuária, os resultados foram promissores ultrapassando em aproximadamente 4,8% a carga de ruptura estipulada pela norma (Tabela 33).

Tabela 33 – Ensaio de flexão - telhas produzidas com água residuária (Amostra B)

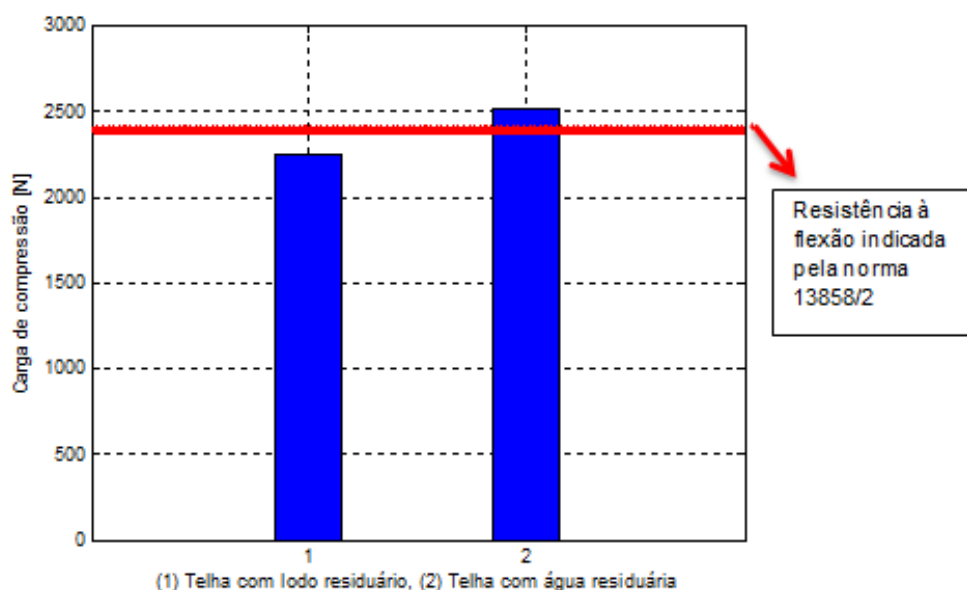
Telha nº	Carga de Ruptura à flexão (N)		
1	2515		
2	2435		
3	2317		
4	2280		
5	2420		
6	2405		
	Classe do Perfil	Profundidade do perfil (d) (mm)	Carga de Ruptura à Flexão (N)
Requisitos NBR 13858-2	A	$d \geq$	≥ 2400
	B	$40 < d \leq 50$	
	C	$30 < d \leq 40$	≥ 2000
	D	$20 < d \leq 30$	
	Plana	$d < 20$	≥ 1200

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 35, é possível observar que as telhas produzidas com o co-produto “água residuária” atendem os parâmetros estipulados pela norma ABNT NBR 13858-2 quanto à resistência à flexão. A linha vermelha indica a resistência à flexão mínima estipulada em norma para telhas de concreto (2400 N).

Outro dado importante é que a massa da telha ficou aproximadamente 1% (0,040kg) mais leve em comparação com a telha padrão de mercado, o que também pode implicar na redução estrutural do telhado.

Figura 35 – Resistência à flexão da telha produzida com água residuária comparada ao lodo



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.14 Teste de absorção de água das telhas de concreto

Após 40 dias foram selecionadas, aleatoriamente, três telhas de concreto, sendo uma telha produzida com lodo residuário, uma telha produzida com água residuária e uma telha padrão de mercado para os testes de imersão por 24 horas. As telhas tiveram suas massas mensuradas e a obtenção do percentual de absorção de água em massa. Na Tabela 34, os resultados indicam que as amostras atendem a NBR 13858-2, isso é, a absorção de água deve ficar abaixo de 10%.

Tabela 34 – Teste de absorção de água (Telhas)

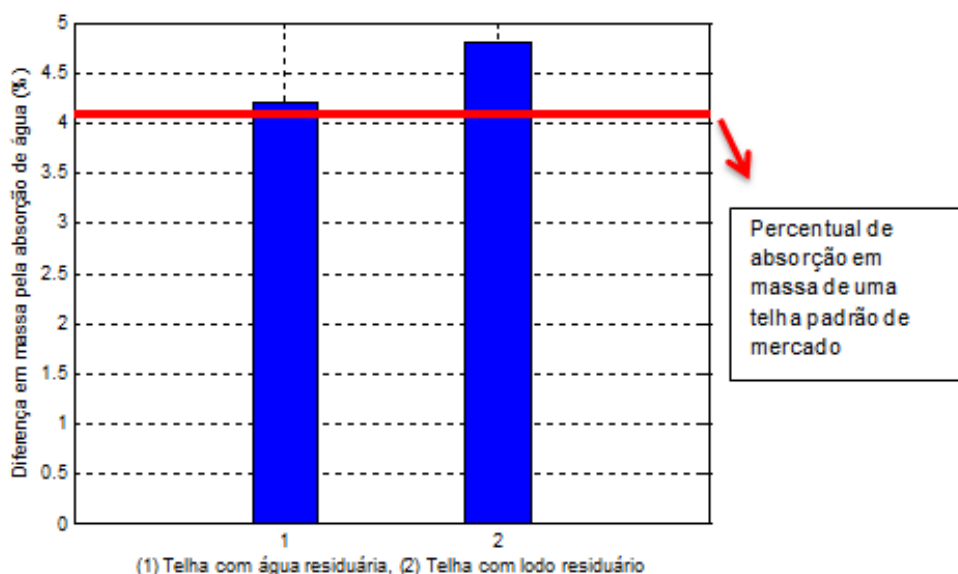
Amostras	Massa Seca	Massa Úmida	Diferença em Massa	Diferença em %
Telha com água residuária	4,655 kg	4,850 kg	0,195 kg	4,2
Telha com lodo residuário	4,365 kg	4,575 kg	0,210 kg	4,8
Telha padrão de mercado	4,715 kg	4,910 kg	0,195 kg	4,1

Absorção de água ABNT NBR 13858-2 < 10%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico (Figura 36), apresenta-se a diferença em massa das telhas devido à absorção de água depois de submetidas ao teste de imersão. A linha vermelha indica o percentual em massa de água absorvida em telha padrão (4,1%). Segundo a norma ABNT NBR 13858-2, esse percentual em massa de absorção deve ser inferior a 10%.

Figura 36 – Análise de absorção de água (Telhas de concreto)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Levando-se em consideração que a norma estipula até 10% de absorção, uma telha padrão de mercado, cuja massa em média é de 4,7 kg, quando úmida, poderá chegar a 5,17 kg.

As telhas produzidas com os co-produtos ficaram mais leves que as telhas adquiridas no mercado o que é condizente com a norma estipulada até 10% de absorção de água.

4.2 Discussões

4.2.1 Dos ensaios ecotoxicológicos

Em conjunto, os bioensaios de ecotoxicidade não mostraram efeito tóxico do efluente (água e lodo), a não ser pelos resultados da exposição de algas verdes (*Raphidocelis subcapitata*), que indicam um possível efeito físico em função da retenção de luz devido a partículas de silício em suspensão no ambiente aquático. Resumidamente, com os bioensaios utilizando-se *Eisenia andrei*, *Raphidocelis subcapitata*, *Allium cepa*, os co-produtos apresentaram-se atóxicos em relação à aplicação como agregados à indústria da construção civil. Os resultados indicam que, para emprego como água de reuso, esse efluente deve sofrer diluição e não foi encontrado efeito mutagênico com os bioindicadores superiores *Allium cepa*.

4.2.2 Dos ensaios com os corpos-de-prova

Em relação ao ensaio de compressão dos quatro lotes avaliados, o lote B correspondente à mistura da massa com a água residuária obteve um resultado significativo próximo ao lote A, produzido com os traços padrão da telha de concreto. Os lotes C e D produzidos com a adição do lodo residuário tiveram sua resistência à compressão abaixo do esperado o que sugere a continuidade dos ensaios até a obtenção do traço ideal, não descartando um possível problema de processo. Os ensaios de imersão indicaram baixa absorção de água nos corpos-de-prova do lote B, favorecendo a produção de artefatos de concreto para a indústria da construção civil, em particular, telhas de concreto. Outra particularidade foi a homogeneização da argamassa resultando em maior impermeabilidade dos artefatos com a utilização da água residuária.

4.2.3 Da produção de protótipos e ensaios com telhas de concreto

As telhas produzidas com os co-produtos foram submetidas a teste de imersão e comparadas com telhas adquiridas no mercado. As produzidas com os resíduos atenderam a norma ABNT NBR 13858-2, com um percentual de absorção abaixo de 10%. Quanto aos ensaios de resistência à flexão, as amostras produzidas com água residuária indicaram a possibilidade de aplicação do co-produto pois, os valores de carga de ruptura permaneceram dentro da norma em questão.

As amostras produzidas com o lodo residuário não atenderam à especificação da norma ficando aproximadamente 6,6% abaixo do recomendado. Isso levou à constatação do elevado teor de umidade do lodo, de 92% em massa, o que pode impactar na homogeneização da mistura para fabricação das telhas.

4.2.4 Proposta de melhoria contínua para a empresa de semicondutores

Em função dos resultados, uma estratégia para negócios e de melhoria contínua para se avaliar a possibilidade de reaproveitamento dos co-produtos foi analisada, visto as empresas estarem bem definidas, bem posicionadas no mercado e intencionadas em dar sequência às pesquisas.

Como proposta para os co-produtos, na Figura 37 é apresentado um plano de melhoria contínua através do PDCA para a empresa parceira de semicondutores dividido em fluxo com oito fases, a fim de se aplicar o projeto na empresa.

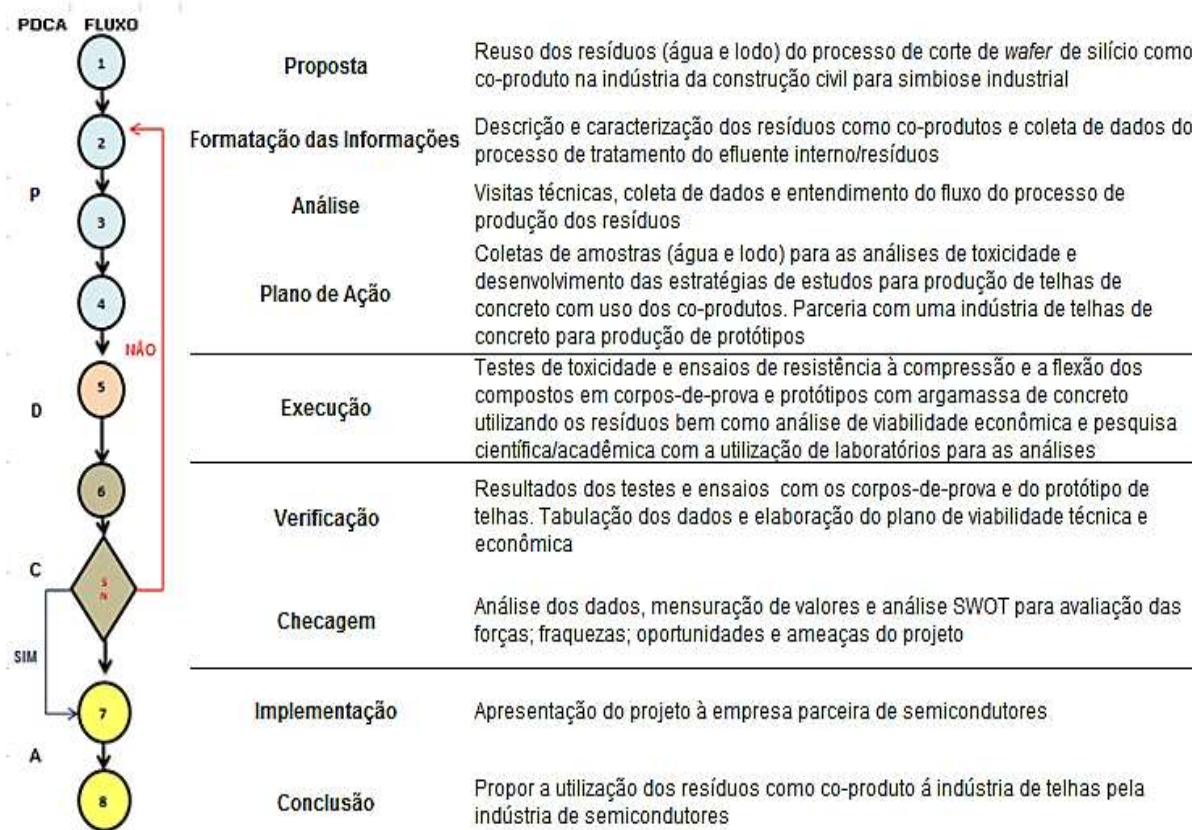
O objetivo desta análise é facilitar possível simbiose industrial, pois depende de um planejamento estratégico em função da sua localização geográfica. Essa simbiose entre as empresas ficará facilitada se a empresa parceira estiver próxima à indústria de telhas de concreto. A adoção de um plano de melhoria contínua poderá proporcionar ganhos econômicos e ambientais às duas empresas.

Além disso, modernamente, em vários casos, designados por Arranjos Produtivos Locais - APLs, esse tipo de organização conjunta de empresas tem certas características das redes de empresas, mas distinguem-se delas por alguns aspectos, dentre os quais se destaca a condição de agrupamento geográfico (COSTA NETO; CANUTO, 2010).

Como se trata de materiais de final de processo produtivo destinados a tratamento interno e descarte externo, a análise de simbiose industrial deve estar

alicerçada nas questões geográficas, pois se as empresas interessadas estiverem distante uma das outras, economicamente o projeto pode se tornar inviável.

Figura 37 – Plano de melhoria contínua para a empresa de semicondutores



Fonte: Adaptado de Campos (1994).

4.2.5 Proposta de oportunidade de negócios para o co-produto (água residuária)

Para a água residuária antes do processo tratamento, pode-se desenvolver um projeto para utilizá-la no processo de produção de telhas de concreto, uma vez que no processo de fabricação das telhas é consumida água como insumo básico.

A empresa parceira trata aproximadamente 1300 m³ de água residuária/mês com um custo aproximado de US\$ 38.612,52/mês. Com essa quantidade de água descartada, levando-se em consideração que, em cada telha, é adicionado aproximadamente 0,3 L de água, será possível produzir mensalmente cerca de 4,3 milhões de telhas de concreto conforme Equação 11.

$$Q_t = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{água/telha}}} \quad (11)$$

onde:

Q_t é a quantidade de telhas

$V_{\text{água}}$ é o volume de água residuária

$V_{\text{água/telha}}$ é o volume de água por telha

Assim, tem-se:

$$Q_t = \frac{1300000\text{L/mês}}{0,3 \text{ L/telha}} \cong 4,33 \times 10^6 \text{ telhas/mês}$$

A princípio, o cálculo demonstra um resultado expressivo de telhas. Porém ressalta-se que a Eternit que é a maior fabricante de telhas de concreto do país manteve a liderança no mercado brasileiro de telhas de concreto em 2013 com participação de 30% do mercado e possui capacidade de produção anual de 10 milhões de metros quadrados de telhas de concreto (ETERNIT, 2013). Segundo Souza et al. (2015), em 1 m² são utilizadas 10,4 telhas. Nesse contexto, 10 milhões de m² de telhas equivale a aproximadamente 104 milhões de telhas/ano ou aproximadamente 8,6 milhões de telhas/mês.

Para a obtenção do modelo matemático que fornece o consumo mensal de água pela linha de produção de telhas de concreto, seja a Equação 12:

$$N = \frac{A_a}{12A_p} \quad (12)$$

onde:

N é a produção mensal de telhas de concreto

A_a é a área total de telhas produzidas em um ano, em m²

A_p é a área projetada de uma telha de concreto em m²

Note que $\frac{A_a}{12}$ representa a área total de telhas produzidas no período de um mês, em m².

A quantidade de água empregada na fabricação de uma telha depende de sua massa e da proporção padrão da quantidade de água na mistura. Assim, tem-se a Equação 13:

$$q = mp \quad (13)$$

onde:

q é a quantidade de água por telha, em litros

p é a proporção de água por telha em porcentagem de massa de mistura

m é a massa de uma telha em kg

Desta forma, das Equações (12) e (13) tem-se que o consumo total C de água mensal para a fabricação de telhas na linha de produção é dado pela Equação 14:

$$C = qN = \frac{mpA_a}{12A_p} \quad (14)$$

Para exemplificar o modelo, considerando dois fabricantes de telhas de concreto, sendo a primeira de pequeno porte com capacidade de produção aproximada de 60000 m²/ano e a segunda de grande porte com capacidade de produção de aproximadamente 10 milhões de m²/ano podem se projetar os seguintes valores de consumo de água em m³.

Considera-se que uma telha tenha por dimensões 420 mm x 330 mm (0,42 m x 0,33 m) e massa aproximada de 4,7 kg. Para a primeira empresa, a área total de telhas produzidas no período de um ano é de aproximadamente 60000 m². Considerando que a proporção em massa de água por telha, empregada em sua fabricação é de aproximadamente 6,3%, pelo modelo matemático acima exposto, pode-se estimar o consumo total de água mensal empregado na fabricação de telhas:

$$C = \frac{4,7 \cdot 0,063 \cdot 60000}{12 \cdot 0,42 \cdot 0,33} = \cong 10,7 \text{ m}^3$$

Assim, a quantidade de água empregada pela indústria de telhas de pequeno porte no período de um mês de produção é $C \cong 10,7 \text{ m}^3$.

Para a indústria de telhas de grande porte, que produz aproximadamente 10 milhões de m^2/ano e aplicando-se os mesmos critérios tem-se:

$$C = \frac{4,7 \cdot 0,063 \cdot 10^7}{12 \cdot 0,42 \cdot 0,33} = \cong 1780 \text{ m}^3$$

A quantidade de água empregada pela indústria de telhas no período de um mês de produção é $C \cong 1780 \text{ m}^3$. Com essa quantidade de água, podem-se produzir aproximadamente 5,8 milhões de telhas.

São propostas duas opções de oportunidade de negócios com água residuária:

Opção 1: enviar o co-produto “água residuária” sem tratamento ao fabricante de telhas próximo ao distrito industrial, onde a empresa parceira está instalada, através de dutos. Pode-se desenvolver uma planta piloto para utilizar a dispersão de silício no processo de fabricação de telhas.

Em princípio, não há necessidade de se mensurarem os custos da operação de transporte rodoviário, pois o co-produto pode ser transportado através de dutos. Nesse caso o que deve ser mensurado é o projeto da linha de dutos do ponto de descarte da empresa de semicondutores até o local de armazenagem por parte da indústria de telhas. Na Tabela 35, é demonstrado o custo mensal e anual do tratamento de efluente pela indústria de semicondutores. Estima-se que se a água for transportada por dutos para a indústria de telhas a empresa parceira de semicondutores terá uma economia aproximada de US\$ 463.350,24/ano.

Supondo-se que hipoteticamente a indústria de telhas de concreto esteja próxima à indústria de semicondutores e utiliza aproximadamente 2580 m^3 de água potável fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP²² para produzir 8,6 milhões de telhas/mês a um custo aproximado de US\$

²² Sabesp alerta que metro cúbico mais barato reduz conta de água - 29/04/2016 Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaold=66&id=6959> Acesso em 01 de julho de 2017.

10,36 por m³ (tarifa de água + tarifa de esgoto) e se houver a diluição em 50% em proporção de água residuária por telha e adotar a água residuária como insumo, a economia será de aproximadamente US\$ 161.616,00/ano. Se a indústria de telhas captar água através de poço artesiano ao custo aproximado de US\$ 8,72 por m³ a economia anual projetada seria de US\$ 136.032,00/ano conforme demonstra a Tabela 36.

Tabela 35 – Custo do tratamento de efluente

Produção de água residuária (m³/mês)	Custo (US\$/m³)	Custo mensal do tratamento (US\$)	Custo anual do tratamento (US\$)
1300	29,70194	38.612,52	463.350,24

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Projeção econômica para captação de água pela indústria de telha de grande porte

Produção de água residuária (m³/mês)	Consumo de água para produção de telhas (m³/mês)	*Custo da água/SABESP (US\$/m³)	Custo da água/Poço artesiano (US\$/m³)	Economia pela indústria de telhas/SABESP (US\$/ano)	Economia pela indústria de telhas/Poço (US\$/ano)
1300	1780	**10,36	***8,72	161.616,00	136.032,00

*Valor referência SABESP R\$ 32,20/m³ convertido em US\$ (base 1US\$ = R\$ 3,1078)

** Tarifa de água + tarifa de esgoto

*** Dado fornecido pela empresa de semicondutores

Fonte: Elaborado pelo autor.

Opção 2: direcionar a água residuária como co-produto ao fabricante de telhas de pequeno porte que está a 30 km da empresa parceira através de caminhões tanque. Para essa opção, deverá ser mensurado o custo logístico e de armazenagem da água em tanques. Hipoteticamente, sabendo-se que um caminhão tanque transporta em média 20 m³ de água, serão necessários 65 caminhões/mês para transportar 1300 m³. Portanto, essa opção é economicamente inviável.

4.2.6 Proposta de oportunidades de negócio para o co-produto (lodo residuário)

Para o lodo residuário, propõe-se melhorar a qualidade do resíduo deixando-o menos úmido e, assim, produzir lotes de telhas com diferentes misturas/traços de adição de lodo, até que se obtenha o resultado ideal em resistência à flexão. O resultado da produção de telha com a adição de 0,130 kg de lodo por telha é de

6,6% menor em resistência à flexão indicada pela norma NBR 13858-2. Nesse sentido, propõe-se esse valor como ponto de partida para a continuidade dos testes.

A empresa parceira de semicondutores descarta aproximadamente oito toneladas de lodo por mês com custo de destinação a aterro industrial de aproximadamente US\$ 1.668,00/mês. Com a quantidade de lodo produzida, levando-se em consideração a adição de 0,130 kg de lodo por telha, será possível produzir aproximadamente 61500 telhas de concreto. Se a proposta é reduzir o percentual de lodo por telha, até a obtenção da proporção ideal, essa estimativa de quantidade pode sofrer variações.

Após determinar o percentual de umidade aceitável, o lodo também poderá ser usado na produção de artefatos de concreto. Nessa hipótese, é necessário considerar o custo logístico para o transporte do co-produto à indústria de telhas. Sabendo-se que a empresa parceira descarta o lodo residuário através de caçambas com capacidade de 2 toneladas ao custo de US\$ 347,51 por viagem por caçamba e a envia para aterro industrial com custo de US\$ 34,75/tonelada e, com base na quantidade de lodo descartado por mês, têm-se os seguintes valores: US\$ 34,75 x 8 toneladas resulta US\$ 278,00/mês para destinação em aterro industrial e US\$ 347,51 x 4 viagens resulta em US\$ 1.390,00/mês para transporte totalizando US\$ 1.668,00/mês. Nessa condição, a economia para a empresa de semicondutores seria de US\$ 20.016,00/ano conforme demonstrado na Tabela 37.

Tabela 37 – Custo de destinação do lodo para aterro industrial

Produção em toneladas de lodo/mês	Custo de destinação para aterro industrial em US\$/mês incluindo o transporte	Custo anual em US\$ para destinação do resíduo à aterro industrial
8	1.668,00	20.016,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

São propostas duas opções de oportunidade de negócios com lodo residuário:

Opção 1: direcionar o co-produto ao fabricante de telhas próximo ao distrito industrial, onde a empresa parceira de semicondutores está instalada.

Opção 2: direcionar o co-produto ao fabricante de telhas que está a 30 km da empresa parceira.

Para ambas as situações, pode-se considerar somente o custo de transporte do lodo uma vez que o resíduo já é transportado para aterro industrial. Após a apresentação dos resultados relativos ao percentual de umidade do lodo, a empresa parceira poderá elaborar um estudo para implantação de um processo através de filtro-prensa para diminuir o percentual de umidade.

4.2.7 Diferencial para a indústria da construção civil

Para o setor da construção civil, a redução de peso estrutural de um telhado pode impactar em economia para a obra. Conforme a norma ABNT NBR 13858-2, são necessárias 10,4 telhas para cobrir 1 m² de telhado e levando-se em consideração que uma telha padrão tem massa aproximada de 4,7 kg têm-se 49 kg/m² em massa de telha. Com a telha produzida com água residuária, a massa é de aproximadamente 48 kg/m². Esse resultado implica aproximadamente 2% de ganho em peso por m².

Tomando-se como base os mesmos parâmetros da telha produzida com água residuária, e considerando-se que a telha produzida com lodo tem massa aproximada de 4,4 kg tem-se um ganho de aproximadamente 7% em peso na estrutura do telhado. Empiricamente, pode-se inferir que a redução de lodo na formulação da massa poderá implicar na redução de peso, pois como investigado, o lodo impacta diretamente na homogeneização dos traços com menor porosidade na mistura da massa da telha. Para as propostas evidenciam-se redução de custos e ganhos ambientais.

4.2.8 Análise de viabilidade técnica, econômica, organizacional e legal

Quanto à análise de viabilidade, a discussão contempla os resultados obtidos como proposta para simbiose industrial, destacando o aspecto da ecologia industrial como diferencial competitivo às empresas em estudo. Segundo Arbucias (2008), a implantação do conceito da Ecologia Industrial viabilizou a existência de outros conceitos, tais como co-produtos, metabolismo industrial, etc., que, por focar o processo, favoreceram a diminuição do consumo de insumos e aumento de produção em ciclo. A mesma autora destacou quatro aspectos a serem discutidos: o

técnico, o econômico, o organizacional e o legal. Para este estudo, os quatro aspectos podem ser avaliados da seguinte forma:

Tecnicamente, se a indústria de telhas de concreto adotar os co-produtos como insumos agregados à produção de telhas, esta poderá ter um diferencial competitivo com um produto inovador e ser pioneira no país na utilização de resíduos de silício como agregado à massa, e no contexto ecológico, que poderá ser estrategicamente adotado como diferencial.

O protótipo das telhas produzidas com os co-produtos apresentaram aparência comparada a telhas comercializadas no mercado. Portanto, faz-se necessário desenvolver uma matriz de oportunidades e ameaças à proposta. Kotler (2000) propõe avaliar o produto por quatro aspectos: forças, fraquezas, oportunidades e ameaças – análise SWOT. Porter (1989) define que o ponto de partida para a análise dos custos é a cadeia de valor de uma empresa, atribuindo-se custos operacionais e ativos a atividades de valor. Os insumos adquiridos fazem parte do custo de cada atividade de valor e podem contribuir para os custos operacionais.

Na Figura 38, é apresentada a análise do ambiente através da matriz SWOT com abrangência do microambiente em que se avaliam as questões que dependem exclusivamente do projeto em estudo. O macroambiente se refere a fatores externos, com interferência direta das empresas estudadas.

Figura 38 – Análise do ambiente através da Matriz SWOT

Análise SWOT para a empresa de semicondutores			
Microambiente		Macroambiente	
Forças	Fraquezas	Oportunidade	Ameaças
Sustentabilidade Ecologia industrial Patente Inovação	Alteração no processo de produção de semicondutores	O co-produto não interfere no processo e nos equipamentos de produção das telhas Legislação ambiental Exclusividade Aparência e peso da telha Simbiose industrial	Não aceite do projeto pela indústria de telhas

Fonte: Adaptado de Kotler (2000).

No âmbito econômico, na Tabela 38, é demonstrado o possível ganho financeiro às indústrias. Caso a empresa parceira de semicondutores decida enviar a água residuária para a indústria de telhas através de dutos, a princípio a economia

seria de aproximadamente US\$ 483.366,24/ano. Os parâmetros para esse cálculo foram o custo anual para tratamento de efluente na ordem de US\$ 463.350,24 e o custo anual de destinação do lodo na ordem de US\$ 20.016,00.

Para a indústria de telhas próxima a de semicondutores, adotando-se o transporte da água por dutos, e considerando-se como referência o uso da água fornecida pela SABESP, a economia, a princípio, seria de aproximadamente US\$ 161.616,00/ano ou se a captação de água for através de poço artesiano projeta-se uma economia aproximada de US\$ 136.032,00.

Devido a limitações do emprego do lodo como agregado a massa da telha resultando em um valor de resistência à flexão abaixo da norma NBR 13858-2, a projeção de ganhos financeiros não foi efetuada.

Tabela 38 – Projeção de ganhos financeiros às indústrias

Descarte do resíduo pela Indústria de semicondutores			Reaproveitamento do resíduo pela Indústria de telhas de concreto	
Tratamento da água residuária. Economia (US\$/ano)	Destinação do lodo à aterro industrial. Economia (US\$/ano)	Economia total (US\$/ano)	Utilização da água residuária pela indústria de telhas. Economia (US\$/ano)	Utilização do lodo residuário pela indústria de telhas. Economia (US\$/ano)
463.350,24	20.016,00	483.366,24	161.616,00 (SABESP) 136.032,00 (POÇO)	*Não calculado
* Devido o resultado negativo para os ensaios à flexão da telha, o possível ganho econômico não foi mensurado.				

Fonte: Elaborado pelo autor.

No contexto organizacional, a empresa de semicondutores demonstrou interesse em dar continuidade às pesquisas e apresentar a proposta para a indústria de telhas de concreto.

No âmbito legal, para as indústrias em estudo, essas atenderão aos requisitos da Lei 12.305/10 da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, quanto ao reuso de resíduos e corroborando com a ecologia industrial como diferencial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Com este estudo foi possível avaliar novas estratégias para reuso de resíduos industriais do setor de semicondutores como co-produtos, pois com a adoção de ensaios, experimentos e análises de processo com a produção de artefatos de concreto, há novas perspectivas para implementação da simbiose industrial.

A pesquisa pode propor às empresas um diferencial competitivo nos aspectos econômicos e ambientais. No aspecto empresarial/acadêmico, algumas empresas não adotam essa parceria como oportunidade de negócios, limitando o desenvolvimento de novas pesquisas e sua própria expansão no mercado. Por outro lado, este estudo foi possível devido ao apoio da empresa de semicondutores e da indústria de telhas de concreto, objeto de estudos que apoiaram a sinergia acadêmico/industrial.

A proposta para um arranjo produtivo entre as empresas pode viabilizar a simbiose para reuso dos co-produtos água e lodo residuários. Após o levantamento e coleta das informações de consumo de água até o descarte, e análise de descrição do processo de tratamento dos resíduos gerados no processo de lapidação, polimento das lâminas de *wafer* de silício e corte individualizado dos *chips*, foram elencadas opções, de acordo com sua importância, para reutilização e do seu aproveitamento na indústria da construção civil, especificamente para produção de telhas de concreto.

A opção por esses setores se deu em função da proximidade da empresa de semicondutores com indústrias de telhas de concreto, corroborando para uma possível simbiose industrial.

A empresa parceira forneceu o fluxograma ilustrativo de tratamento e uso da água, que foi adaptado para respeitar a confidencialidade dos processos e para permitir o levantamento das opções de prevenção de consumo e descarte de água. A análise do fluxograma inicial também indica que a água é reciclada internamente em vários ciclos, o que se compõe em um incipiente ecossistema interno.

Para ocorrer o reaproveitamento da água residuária é preciso salientar que o sistema de tratamento de efluentes deve ser otimizado em termos de evitar-se diferentes taxas de precipitação do material particulado. Não só a água, mas

também o lodo de silício podem ser avaliados para uso alternativo como co-produtos para a indústria da construção civil.

Como proposta para o setor tático da organização, uma oportunidade de negócios para reutilização dos co-produtos necessita da avaliação de todo o sistema de acordo com um plano de melhoria contínua para estabelecer metas de reutilização dos co-produtos com parceiros externos, proporcionando a inserção de simbiose industrial.

Quanto ao aspecto operacional, a empresa parceira de semicondutores, deverá controlar o fluxo de partículas na água e o de resíduos enviados às futuras empresas parceiras do setor da construção civil.

A estratégia para os co-produtos propondo a simbiose industrial depende da localização geográfica das empresas. A proximidade entre as empresas é um condicionante para viabilidade econômica do estudo pois, próximas à empresa parceira existem indústrias de telhas de concreto e isso pode contribuir positivamente para a redução das operações logísticas.

A pesquisa avaliou a possibilidade do uso da ecologia industrial no fluxo de produção de semicondutores para a melhoria da sustentabilidade quanto ao descarte de resíduos industriais.

Os dados obtidos nos ensaios ecotoxicológicos, nos experimentos e na análise dos protótipos indicaram vantagens para reuso dos resíduos como co-produtos, propondo simbiose industrial de modo a possibilitar a diminuição do impacto ambiental na área de descarte.

Quanto aos objetivos propostos aos co-produtos, a pesquisa revelou que há um nicho a ser explorado pelo setor de telhas quanto à obtenção de matéria-prima, e pelo de semicondutores com grande contribuição para a gestão de resíduos.

A empresa parceira possui uma visão organizacional moderna desde a captação de recursos, nesse caso a água, até a gestão dos resíduos gerados durante o processo, nesse caso a água e o lodo residuários. A adoção de estratégias para simbiose industrial com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS pode representar às empresas analisadas uma importante oportunidade de negócios, e essas adoções podem se concretizar em um diferencial competitivo comparado às empresas que não praticam estratégias de sustentabilidade em seus processos produtivos.

Ao criar protótipo (telha de concreto), a pesquisa identificou que a transformação e o reuso dos resíduos como co-produtos do setor de semicondutores, podem ser comercializados, propondo ao processo um ciclo de produção mais limpo.

5.2 Limitações da pesquisa

A pesquisa limitou-se à aplicação dos co-produtos na produção de telhas de concreto, em função da viabilidade e possibilidade de um arranjo produtivo local, viabilizando simbiose entre os setores produtivos.

5.3 Proposta futura

Com base nos resultados obtidos, propõe-se a continuidade das pesquisas para possibilidades de arranjo produtivo local entre os setores analisados, pois, apesar de telhas produzidas com lodo residuário apresentarem resistência à flexão aproximada de 6,6% abaixo da norma ABNT NBR 13858-2, nos demais aspectos mostraram-se promissoras, ressaltando o aspecto da redução de 7% em massa comparado à telha padrão de mercado. Isso resulta em uma cobertura de telhado mais leve e econômica com relação à estrutura padrão de mercado. Portanto, faz-se necessária a continuidade dos estudos, até que se obtenha a composição adequada da adição do lodo residuário à massa da telha.

A indústria de telhas que colaborou com a produção de protótipos demonstrou interesse em continuar a produzir lotes até que se obtenha o padrão desejado em norma. A empresa parceira produtora de semicondutores e a indústria de telhas de concreto pretendem dar continuidade ao proposto neste estudo.

Outra possibilidade é a aplicação do lodo na agricultura no processo de compostagem uma vez que estudos, a princípio, não indicaram toxicidade aguda em solo, quando se expuseram indivíduos da espécie *Eisenia andrei* ao lodo, o que requer a continuidade das pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland - **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7 ed. 28 pg. (BT-106) ISBN 85-87024-23-X - São Paulo, 2002.

ABCP - Associação Brasileira de 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 06 de abril de 2017.

ABDEL-RAOUF, N; AL-HOMAIKAN, A. A.; IBRAHEEM, I.B.M. **Microalgae and wastewater treatment** - King Saud University - Saudi Journal of Biological Sciences – Elsevier - 19, 257–275, 2012.

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - **As Design Houses (DHs) Brasileiras - Relatório Analítico**. Brasília, Novembro/2011. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/Relatorio_Design_Houses_FINAL_280312.pdf>. Acesso em 19 de janeiro de 2016.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - **Balança Comercial do setor eletroeletrônico - Janeiro a Março de 2015**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon10.htm>>. Acesso em 14 de maio de 2015.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - **Balança Comercial do setor eletroeletrônico (janeiro de 2017) – Importação de Semicondutores**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon10.htm>>. Acesso em 18 de março de 2017.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 10006/04** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 13858-2/97** Telhas de concreto - Parte 2 - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

_____. **NBR 10007/04** Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 13858-1/97** Telhas de Concreto - Parte 1 - Projeto e Execução de Telhados. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

_____. **NBR 5739/07** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

_____. **NBR 5738/03** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de Corpos-de-prova. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 7215/96** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

_____. **NBR 10004/04** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 10664/89** Águas – Determinação de Resíduos (sólidos) – Método Gravimétrico. Rio de Janeiro, RJ, 1989.

_____. **NBR 7217/87** Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1987.

_____. **NBR 15527/07** Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

_____. **NBR 9800/87** Critérios para lançamento de efluentes. Rio de Janeiro, RJ, 1987.

_____. **NBR 11578/91** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

_____. **NBR 5735/91** Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

_____. **NBR 5733/91** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

_____. **NBR 7211/83** Agregado para concreto. Rio de Janeiro, RJ, 1983.

ABRAFE - Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico – **Silício Metalúrgico** – Disponível em: <<http://www.abrafe.ind.br/pesquisa>>. Acesso em 04 de outubro de 2015.

AKBARI, Hashem; LEVINSON, Ronnen; BERDAHL, Paul. - **A Review of Methods for the Manufacture of Residential Roofing Materials**. Heat Island Group - Lawrence Berkeley National Laboratory - Berkeley, CA 94720 - A Report Prepared for: California Energy Commission PIER Program - Program Manager: Nancy Jenkins - Project Manager: Chris Scruton - This study was supported by funding from the California Energy Commissions (CEC) through the U.S. Department of Energy under contract DE-AC03-76SF00098. LBNL-55574 – jun., 2003.

ALMEIDA, Cecília M.V.B. de; GIANNETTI, Biagio F. **Ecologia industrial: Conceitos, ferramentas e aplicações**. 109 pg. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

ANICER - Associação Nacional da Indústria Cerâmica. **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto**. Relatório final preparado para ANICER - 09 de agosto de 2011. Humbert S, Margni M, Joliet O. 2009. IMPACT 2002+ user guide: draft for version 2.1. Quantis, Lausanne, Switzerland. <<http://www.impactmodeling.org>>. Disponível em: <<http://anicer.com.br/acv/ACV%20Telhas%20Cer%C3%A2micas.pdf>>. Acesso em 03 de setembro de 2016.

ARAÚJO, Janaína. **Dosagem e Controle de Concretos (Fcj)** - PUC Goiás, 2009 – Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/13326/material/concreto%20-%20Dosagem%20e%20controle%201.pdf>>. Acesso em 08 de agosto de 2016.

ARBUCIAS, Janaína Gameiro. **Desenvolvimento de Tecnologias Mais Limpas Aplicadas à Microeletrônica**. Dissertação de Mestrado – 102 pg. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

ARBUCIAS, Janaína Gameiro. **Melhoria da Sustentabilidade pela Aplicação do Conceito de Ecologia Industrial: Estudo de Caso no Setor Eletroeletrônico**. Tese de Doutorado em Engenharia – 162 pg. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

ARENZON, Alexandre; NETO, Tiago José Pereira; GERBER, Wagner. **Manual sobre toxicidade em efluentes industriais**. Federação das Indústrias do Rio Grande do Sul – (FIERGS) - Conselho de Meio Ambiente – (CODEMA) – 42 pg. – Porto Alegre, 2011.

AWALEH, Mohamed Osman Awaleh; SOUBANEH, Youssouf Djibril. **Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies**. Hydrology Current Research - Res 5: 164. 5:1 <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7587.1000164> - Awaleh and Soubaneh, 2014.

AY, Nuran; ÜNAL, Mevlüt. **The use of waste ceramic tile in cement production**. Technical Note – Pergamon – Elsevier Science Inc. - Cement and Concrete Research 30 - 497 – 499., 2000.

BALLOU, Ronald H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. – 1. ed. 18. reimpr. 388 pg. São Paulo: Atlas, 2007.

BALSAMO, Paulo; MARTINS, Creslei Antônio; CHAGAS, Rosangela de Cassia Catani; SOUZA, Bruno Fernando Santos de; GOMES, Amanda Leopoldina Soares; CACURO, Thiago Aguiar; BREJÃO, Antônio Sergio; IRAZUSTA, Silvia Pierre. **Ecotoxicidade do efluente e lodo da ETE de uma indústria de eletroeletrônicos**. XIV Congresso Brasileiro de Ecotoxicologia - 07 - 10 Setembro – Curitiba – PR, 2016.

BARBOSA, Carlos Eduardo Galvão; WINTER, Daniel Hugo; SEISCENTO, Márcia; SANTOS, Ubiratan de Paula; FILHO, Mário Terra. **Tuberculose e silicose: epidemiologia, diagnóstico e quimioprofilaxia**. Jornal Brasileiro de Pneumologia – v.34 nº11 959-966., 2008.

BERTAGLIA, Paulo Roberto. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento**. 2. ed. rev. e atual - 546 pg. São Paulo: Saraiva, 2009.

BLAISE, C.; FORGET, G.; TROTTIER, S. **Toxicity screening of aqueous samples using a cost-effective 72-h exposure Selenastrum capricornutum assay**. Journal of Environmental Toxicology. Special Issue: Watertox Bioassays. v. 15, pg. 352-359 - New York, 2000.

BORAL Roofing LLC. - Andrew Hunt. **Sustainable Green Building with Clay and Concrete Roof Tile** – Continuing Education Series - Course valid through August, 2015 - Boral Roofing LLC is a subsidiary of Boral USA, the country's largest premium provider of complete roofing and reroofing solutions for architects as well as commercial and residential builders. Boral Roofing operates 15 clay and concrete tile manufacturing plants throughout the U.S. and Mexico. Disponível em: <<http://www.boralamerica.com/Media/Default/Temp/PDF%20Fills/AIA-CEU-Print-Version.pdf>>. Acesso em 11 de julho de 2016.

BRASIL - LEI Nº 11.484, de 31 de maio de 2007. **Do apoio ao desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11484.htm>. Acesso em 14 de maio de 2015.

BRASIL - Decreto Nº 6.233, de 11 de outubro de 2007. **Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores – (PADIS)**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/Decreto/D6233.htm#art23>. Acesso em 14 de maio de 2015.

BRASIL – LEI Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 04 de agosto de 2016.

BRASIL - **Meio ambiente/Sustentabilidade** – 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/02/sustentabilidade>>. Acesso em 31 de agosto de 2016.

BRASIL – Senado Federal - **Conferência Rio-92 sobre o meio ambiente do planeta: desenvolvimento sustentável dos países**. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/rio20/a-rio20/conferencia-rio-92-sobre-o-meio-ambiente-do-planeta-desenvolvimento-sustentavel-dos-paises.aspx>>. Acesso em 09 de junho de 2017.

BREJÃO, A. Sérgio. **Possível Impacto da Logística Reversa na Melhoria da Sustentabilidade: Um Estudo de Caso do Setor Eletroeletrônico**. 148 pg. - Dissertação de Mestrado - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – (CEETEPS) – São Paulo, 2012.

BROCH, Siomara Cristina. **Aspectos teóricos e computacionais das estatísticas do teste de Dunnett não-central**. Tese de Doutorado – 240 pg. Universidade Federal de Lavras – Lavras, 2013.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC: gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia** – Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 276 pg. Rio de Janeiro: Bloch, 1994.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) Setorial 40 - pg. 205-234. Rio de Janeiro, 2014.

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - Ministério do Meio Ambiente - PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. - **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas.** - Versão 1 - Subsídios para a Promoção da Construção Civil Sustentável – Novembro, 2014.

CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural da Universidade de São Paulo – USP. **Propriedades do Silício.** – São Paulo, 2014.

CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. – **Rede de Produção Mais Limpa – Guia da Produção Mais Limpa.** Disponível em: <<http://cebds.org/wp-content/uploads/2016/09/Guia-Pra%CC%81tico-de-PmaisL.pdf>>. Acesso em 06 de abril de 2017.

CEITEC Semicondutores – **Institucional.** Disponível em: <<http://www.ceitec-sa.com/pt/historico>>. Acesso em 18 de maio de 2015.

CEITEC Semicondutores - **Produtos Serviços - Afinação e corte de wafers** – Disponível em: <<http://www.ceitec-sa.com/pt/servicos>>. Acesso em 14 de maio de 2015.

CHAPMAN, P. M. **Integrating toxicology and ecology: putting the "eco" into ecotoxicology.** Marine Pollution Bulletin, v.44, pg.7-15, 2002.

CIMENTO ITAMBÉ - **Telhas de Concreto** – 11/2010 – Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/telhas-de-concreto/>>. Acesso em 17 de março de 2016.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica - **Material Didático / Meio Ambiente / Efluentes Industriais.** (2016). Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3669-efluentes-industriais#>>. Acesso em 14 de outubro de 2016.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica – Dicionário - **Co-produto: Final do item produzido como resultado de um processo.** (2017). Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1754-co-produto>>. Acesso em 06 de abril de 2017.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. **Material Didático / Meio Ambiente / Resíduos Sólidos Industriais.** Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3668-residuos-solidos-industriais#.WTMKmruGNjo>. Acesso em 03 de junho de 2017.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. **O que é sílica?** Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1636-silica>>. Acesso em 10 de junho de 2017.

COB - Comitê Olímpico do Brasil, 2015 – **Piscina olímpica**. Disponível em: <<https://www.cob.org.br/pt/Esportes/natacao>>. Acesso em 31 de agosto de 2016.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente – **RESOLUÇÃO Nº 307**, de 5/07/2002 - Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, pg. 95-96. Disponível em: <https://www.unifesp.br/reitoria/dga/images/legislacao/residuos2/CONAMA_RES_CONS_2002_307.pdf>. Acesso em 10 de junho de 2017.

COSTA NETO, Pedro Luiz de O.; CANUTO, Simone A. **Administração com qualidade: conhecimentos necessários para a gestão moderna**. 356 pg. São Paulo: Blucher, 2010.

COSTA, H. K. M.; SIMÕES, A. F.; SANTOS, E. M.; BECK, R. T. **Reflexão sobre o Conceito de Sustentabilidade e a Proposição de sua Integralidade**. “INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES” 4th International Workshop Advances in Cleaner Production - São Paulo – Brazil – May 22 to 24, 2013.

COSTA, Maria Isabel Lopes da, SILVA, Elmo Rodrigues da, MATTOS, Ubirajara Aluizio de Oliveira. **20 anos de Eco-eficiência no Brasil: de estratégia de negócios a princípio de Política Pública**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 8, n. 1, pg. 3-28, jan-abr, 2012.

CRUZ, Maria Alice da. **Integrado à paisagem**. Jornal da UNICAMP 193 - Ano XVII - 7 a 13 de outubro de 2002. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/outubro2002/unihoje_ju193pag8b.html>. Acesso em 21 de maio de 2017.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. - Lei Estadual Nº 12.183, de dezembro de 2005 - **Dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos do domínio do Estado de São Paulo, os procedimentos para fixação dos seus limites, condicionantes e valores e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/legislacao/arquivos/715/LE12183.pdf>>. Acesso em 11 de setembro de 2016.

DANCO ROOFING. **The History of Concrete Tile**. Disponível em: <<http://www.dancoroofs.com/custom/index.cfm?id=194679>>. Acesso em 10 de agosto de 2016.

DIAS, Marco Aurélio P. **Administração de materiais: princípios, conceitos e gestão**. – 6 ed. 346 pg. 5 reimpr. – São Paulo: Atlas, 2011.

DWYER, K. J.; POMEROY, J. M.; SIMONS, D. S.; STEFFENS, K. L.; LAU, J. W. **Enriching 28Si beyond 99.9998% for semiconductor quantum computing**. Department of Materials Science and Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20740, USA - National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-8423, USA - J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 345105 (6pp) doi:10.1088/0022-3727/47/34/345105 Journal of Physics D: Applied Physics – IOP Publishing – IOPSCIENCE, 2014.

EPS - Environmental Protection Series. **Method.** - Development and Applications Section, Environmental Science and Technology Centre, Science and Technology Branch Environment - Canada - Report (EPS) 1/RM, 2007.

ETERNIT - **Relatório Anual de 2013** – Disponível em: <<http://ri.eternit.com.br/>>. Acesso em 22 de março de 2016.

Ewing's Analytical Instrumentation Handbook – Third Edition – Edited by Jack Cazes - pg. 73 - Florida Atlantic University - Boca Raton, Florida, U.S.A. - ISBN: 0-8247-5348-8 - Copyright© 2005 - by Marcel Dekker - New York, NY - U.S.A, 2005.

FACCIN, Kadígia; BALESTRIN, Alsones. **Práticas Colaborativas em P&D: Um Estudo na Indústria Brasileira De Semicondutores.** XXXVIII Encontro da ANPAD. Rio de Janeiro – 13 a 17 de setembro de 2014. Disponível em: <<http://www.anpad.org.br/admin/pdf/GCT1566.pdf> >. Acesso em 19 de janeiro de 2016.

FANTINATO, Marcelo. **Métodos de Pesquisa.** PPgSI – EACH – Universidade de São Paulo – USP, 2015.

FARIA, Dalva L. A. de. **Entenda o que é espectroscopia Raman.** Laboratório de Espectroscopia Molecular - Instituto de Química da USP - <http://lem.iq.usp.br> - Revisão: Prof. Antônio Carlos Massabni – UNESP - Araraquara - Artigo publicado pelo Química Viva - CRQ-IV - Publicado em 01/07/2011. Disponível em: <http://crq4.org.br/sms/files/file/Espectroscopia_Raman_4.pdf>. Acesso em 04 de janeiro de 2016.

FARIAS, David Berto. **Estudo do Processo de Purificação do Silício Grau Metalúrgico na Fabricação de Células Fotovoltaicas.** Centro Universitário Fundação Santo André – Faculdade de Engenharia Celso Daniel – Engenharia Eletrônica – Ênfase em Eletrônica Industrial - Relatório apresentado ao Programa de Iniciação Científica do Centro Universitário Fundação Santo André – PIIC, 2013.

FERNANDES, Idário Domingues. **Telhas de Concreto – Produção e Controle de Qualidade.** – Edição 01 – 112 pg. ISBN 978-85-62290-02-2 - São Paulo: Editora Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2012.

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento – Série P+L.** São Paulo, 2006.

FILHO, Mario Terra; SANTOS, Ubiratan de Paula. **Silicose.** Trabalho realizado na Disciplina de Pneumologia do Instituto do Coração do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo - InCor-HSFMUSP - Jornal Brasileiro de Pneumologia. vol. 32 suppl.2 - São Paulo: 2006.

FONSECA, G. C., **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Tese de doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais - programa de pós-graduação em construção civil, Belo Horizonte, 2010.

GARCIA, Marcos V. **Effects of pesticides on soil fauna: Development of ecotoxicological test methods for tropical regions**. Ecology and Development Series N°. 19 - 281 pg. - Germany, University of Bonn, 2004.

GONÇALVES, Rodrigo Franco; PESSÔA, Marcelo Schneck de Paula; SPINOLA, Mauro de Mesquita; PRADO, José Pacheco de Almeida. **A Importância de Representar Pessoas na Modelagem de Processos de Negócio: uma aplicação em reengenharia**. - XXV Encontro Nac. de Eng. de Produção – Porto Alegre, RS, Brasil, 29 out a 01 de nov. de 2005 - ABEPRO 4640 – ENEGEP, 2005.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. Clube do Concreto. **Granulometria e Módulo de Finura**. (2013) Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/05/video-do-ensaio-de-granulometria.html>>. Acesso em 16 de abril de 2016.

GUIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho Comparado – Telhas de Concreto x Telhas cerâmica** - Revista Guia da Construção – 127 - pg 18 e 19 – São Paulo, 2012.

HAMASSAKI, Luiz Tsuguio; SANTOS, Rafael F. Cardoso dos. **Soluções Inovadoras – Corpos de prova**. pg. 48 - Revista Notícias da Construção / novembro, 2013.

HANGARGEKAR, P. A; TAKPERE, K. P. A. **Case Study on Waste Water Treatment Plant, CETP (Common Effluent Treatment Plant)** International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE) ISSN: 2349-2163 Issue 11, Vol. 2 – nov., 2015.

IIEP - Intercâmbio, Informações, Estudos e Pesquisas – **Método de Czochralski** - Guia de Referência em Nanotecnologia (2010). Disponível em: <<http://nano.iiep.org.br/node/936>>. Acesso em 10 de abril de 2016.

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial – Resolução N° 175, de 05 de novembro de 2016. **Disciplina o exame prioritário de pedidos de “Patente Verde”**. Disponível em: <http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/arquivos-dirpa/resol175de05nov2016_PATENTES2396.pdf>. Acesso em 21 de maio de 2017.

IPC - Association Connecting Electronics Industries. - **The International Electrochemical Commission's (IEC) Definition of Halogen-Free** - 2016 - Disponível em: <<http://www.ipc.org/contentpage.aspx?pageid=IEC-Definition-of-Halogen-Free>>. Acesso em 05 de fevereiro de 2016.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Análise químicas para adequação à Diretiva RoHS – Restrictions of the use of Certain Hazardous Substances**. - Disponível em: <http://www.ipt.br/solucoes/30-analises_quimicas_para_adequacao_a_diretiva_rohs.htm>. Acesso em 05 de fevereiro de 2016.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. – **Silício grau metalúrgico** - Rota metalúrgica para produção de Silício Grau Solar. Disponível em: <<http://www.ipt.br/projetos/5.htm>>. Acesso em 30 de março de 2017.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica. **Rota metalúrgica para produção de Silício Grau Solar**. – Disponível em: <<http://ipt.br/projetos/5.htm>>. Acesso em 03 de fevereiro de 2016.

JUAN-GARCÍA, P; BUTLER, D., COMAS, J.; DARCH, G.; SWEETAPPLE, C; THORNTON, A; COROMINAS, LI. **Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art**. Science Direct - Elsevier - 149 e 161 - Water Research 115, 2017.

KOTLER, Philip. **Administração de Marketing: a edição do novo milênio**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

LACERDA, Priscila M. de Maio; SOUZA, Cláudia Santos; IRAZUSTA, Sílvia Pierre. **Atividade Mutagênica em *Allium cepa* da Água de Irrigação de hortaliças na região de Itapeverica da Serra - SP**. VI Workshop de Pós-Graduação e Pesquisa do Centro Paula Souza – ISSN: 2175-1897 - Unidade de Ensino de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa – 09 e 10 de novembro de 2011.

LEE, Tzen Chin; LIU, Feng Jiin. **Recovery of hazardous semiconductor-industry sludge as a useful resource**. Journal of Hazardous Materials - Volume 165, Issues 1–3 pg. 359 – 365 – Elsevier, 2009.

LEITE, Paulo Roberto. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. 240 pg. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEWIS, Philip A.L; KLEM, D. J.; LAZORCHAK, J. M. **Short term methods for estimating the cronic toxicity of effluents and receiving waters to freshwater Organism EPA – 600/4-91-022**, 3th ed., USEPA, 1992.

LIMA, Anita Maria de; MELO, Josette Lourdes de Sousa; MELO, Henio Normando de Souza; CARVALHO, Fabíola Gomes de. **Avaliação do Potencial Fitorremediador da Mamona (*Ricinus communis* L) Utilizando Efluente Sintético Contendo Chumbo**. - Holos, Ano 26, Vol. 1 pg. 51, 2010.

LIMAD, Waltson G Neto; MACORIM, Carolina; SILVA, Maria Lúcia Pereira da. **A Compreensão do Conceito de Sustentabilidade pelo Setor Produtivo: Um Estudo de Caso**. Boletim Técnico da FATEC - SP - BT/ 26 – pg. 28 a 31 – Maio, 2009.

LIMAD, W. G. N. **Utilização de Conceitos e Ferramentas da Logística para a Melhoria da Sustentabilidade: Um Estudo de Caso**. 2010. 148 pg. Dissertação (Mestrado em Tecnologia: Gestão, Desenvolvimento e Formação) – CEETEPS, 2010.

LUZ, Adão Benvindo da; BRAZ, Eliezer. - **Quartzo** - (Série Rochas e Minerais Industriais, 2) 1. Quartzo. I. Eliezer Braz. II. Centro de Tecnologia Mineral. III. Título. IV. Série 20 pg. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

MA, Te-Hsiu; ANDERSON, Van A.; HARRIS, Mary M.; NEAS, Robert E.; LEE, Tze-San. **Mutagenicity of drinking water detected by the Tradescantia micronucleus test.** - (doi: 10.1139/g85-022) - Vol. 27, Nº. 2 pg.143-150 - Canadian Journal of Genetics and Cytology, 1985.

MA, T. H.; XU, Z.; XU, C; McConnel, H.; RABAGO, E. V.; ARREOLA, G. A.; ZHANG, H. **The improved Allium/Vicia root tip micronucleous assay for clastogenicity of environmental pollutants.** Mutation Research, v. 334, pg. 185 -195, 1995.

MAIA, Ângelo Felisberto Martins Teixeira. **Estudo da Influência de Variáveis do Processo de Corte em Wafers para Semicondutores nas Avarias Elétricas Devidas a “Curling”.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Instituto Superior de Engenharia do Porto - Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, 2013.

MANOGNA, Ponnappati; LAKSHMI, M. Sri. **TILE POWDER AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT IN CONCRETE.** International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 02 pg.75 Issue: 04 jul., 2015.

MARIANI, Carolina F. **Ecotoxologia.** Departamento de Ecologia - Laboratório de Limnologia – IB/USP – Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=143&Itemid=419>. Acesso em 09 de outubro de 2016.

MARINHO, Maerbal; KIPERSTOK, Asher. **Ecologia industrial e prevenção da poluição: uma contribuição ao debate regional** – Bahia Análise & Dados – Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica DEA/DEQ - Rede de Tecnologias Limpas – TECLIM - Salvador - BA - SEI v.10 n.4 p.271-279 março, 2001.

MAS, María A; MONZÓ, José; PAYÁ, Jordi; REIG, Lucía; BORRACHERO, María V. **Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement.** 00(00), 1–12 ICE – Institution of Civil Engineers - <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.15.00021> Advances in Cement Research, 2015.

MEI, Paulo Roberto. **Inovação para o Estabelecimento do Setor de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.** Workshop - Parceria Universidade - Empresa: Purificação de Silício Grau Solar - Depto. Engenharia de Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP - 3º Inova FV - Prof. Gilberto de Martino Jannuzzi - Coordenador - Campinas – SP. 05 e 06 de março, 2013.

MEI, Paulo Roberto. **Silício: Graus de pureza e aplicações.** Trabalho apresentado no Workshop “Cadeia Produtiva do Silício Solar: a Importância da Matéria Prima” CETEM-MCT, Rio de Janeiro, 2008.

MEI, Paulo R. **Silício brasileiro para células solares**. Pesquisa FAPESP 197. (2012). Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2012/07/Pesquisa_197-12.pdf?2e87e7>. Acesso em 23 de abril de 2017.

MINASLIGAS - **Silício Metálico**. (2015) - Disponível em: <http://www.minasligas.com.br/produtos_abre.asp?area=3&secao=3&tp=1&site=1&id=3>. Acesso em 16 de janeiro de 2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resíduos Inertes - Classe II B**. – Resolução nº 452, de 02 de julho de 2012. – Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res12/Resol452.PDF>>. Acesso em 05 de fevereiro de 2016.

MME – Ministério de Minas e Energia. – **Agregados para Construção Civil** – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM – Banco Mundial – Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD - Produto 22 - Relatório Técnico 31 - Perfil de areia para construção civil - Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia – agosto, 2009.

MONTEIRO, Regina T. R. **Ecotoxicológicas com organismos bioindicadores aquáticos (Algas Pseudokirschineriella Subcaptata)**. (Orientações) - Laboratório de Ecologia Aplicada do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA – USP - Universidade de São Paulo, 2016.

MORI, Vânia, SANTOS, Ronaldo Luiz Correa dos, SOBRA, Luiz Gonzaga Santos - **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. – Série Tecnologia Ambiental, 41 - 42p. ISSN 0103-7374 ISBN 978-85-61121-09-9 - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

MORIMOTO, Carlos E. **Como são fabricados os processadores**. Hardware, o Guia Definitivo. Publicado em 2007 pelo site www.hardware.com.br Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/livros/hardware/como-sao-fabricados-processadores.html>>. Acesso em 30 de agosto de 2016.

NETO, Geraldo Cardoso de Oliveira; FILHO, Moacir Godinho; GANGA, Gilberto Miller Devós; NAAS, Irenilza Alencar; VENDRAMETTO, Oduvaldo. **Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas brasileiras**. - G&P – Gestão e Produção - <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1468-14> - São Carlos, v. 22, n. 2, pg. 326-344, 2015.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OBAPL - Observatório Brasileiro de Arranjos Produtivos Locais - **APLs, o que são!?** - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC, 2011.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development – **Guideline For Testing of Chemicals 207 - Earthworm, Acute Toxicity Tests**. Adopted: 4 April 1984. - Disponível em: <<http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948293.pdf>>. Acesso em 07 de setembro de 2016.

Orçamento Federal - **Mapa Geográfico do Brasil**. Disponível em: <http://www.orcamentofederal.gov.br/clientes/portalsof/portalsof/orcamentos-anuais/mapa_brasil.jpg/image_view_fullscreen>. Acesso em 26 de março de 2017.

PAVANI, Orlando Júnior; SCUCUGLIA, Rafael. **Mapeamento e Gestão por Processos – (BPM). Gestão orientada à entrega por meio de objetos. Metodologia GAUSS**. 376 pg. São Paulo: M. Books do Brasil Editora, 2011.

PBSI – Programa Brasileiro de Simbiose Industrial. **O que é Simbiose Industrial?**. Workshop: Conectando Empresas, criando oportunidades: 2012. Federação das Indústrias de Minas Gerais - Disponível em: <<http://www.fiemg.org.br/admin/BibliotecaDeArquivos/Image.aspx?ImgId=34396&TabId=10710&portalid=59&mid=22078>>. Acesso em 13 de janeiro de 2016.

PEREIRA, André Luiz; BOECHAT, Cláudio Bruzzi; TADEU, Hugo F. Braga; SILVA, Jersone T. Moreira; CAMPOS, Paulo M. Silva. **Logística reversa e sustentabilidade**. 192 pg. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

PETRIE, Bruce; BARDEN, Ruth; KASPRZYK–HORDERN, Barbara. **A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring**. Science Direct – Elsevier – Water Research 72 3 e 27, 2015.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Novas Tecnologias para Processos Industriais: Eficiência Energética na Indústria**. - Confederação Nacional de Indústria (CNI) com a Eletrobrás formada por intermédio do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e seu subprograma PROCEL Indústria – Eficiência Energética Industrial, 2012.

PORTAL DO CONCRETO. **Cimento Portland Pozolânico** - Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cp4.html>>. Acesso em 26 de novembro de 2015.

PORTAL DO CONCRETO. **Significado de MPa**. – Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/fck.html>>. Acesso em 08 de agosto de 2016.

PORTER, Michel E. **Vantagem Competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior**. 512 pg. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

PROGRAMA CI-BRASIL. **Estratégias de fomento à criação e implantação de empresas de projetos de circuitos integrados – Design Houses (DH) – (2006)**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8078.pdf>. Acesso em 12 de julho de 2016.

QUEIROZ, Emanuel F. **Melhoria de Processos pelo Levantamento de Indicadores Ambientais via Software**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – 171 pg. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, 2006.

QUEIROZ, Emanuel F. de; SILVA, Maria Lúcia Pereira da. **Melhoria de Processos no Setor Eletroeletrônico pelo Levantamento de Indicadores Ambientais via Software**. 1st International Workshop Advances in Cleaner Production – novembro pg. 21-23 – São Paulo, 2007.

QUIMLAB Soluções em Química. **Silício** – Disponível em: <<http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/silicio.htm>>. Acesso em 04 de outubro de 2015.

REIS, Marcelo M. **Estatística - Coeficiente de variação** (2010) Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/AED04.pdf>>. Acesso em 25 de julho de 2017.

REIS, João Gilberto Mendes dos; NETO, Mário Mollo; VENDRAMETTO, Oduvaldo; COSTA NETO, Pedro Luiz de Oliveira. **Qualidade em redes de suprimentos: a qualidade aplicada ao supply chain management**. 320 pg. São Paulo: Atlas, 2015.

REVISTA FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – **Tecnociência. Silício brasileiro para células solares**. ed. 197 | 17 de julho, 2012.

ROCHA, Gustavo Adolfo. **Quartzo (Cristal)** - Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) – Sumário Mineral, 2014.

RODRIGUES, Fabrício de Ávila; OLIVEIRA, Lilian Aparecida de; KORNDÖRFER, Ana Paulo; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique. **Silício: Um Elemento Benéfico e Importante para as Plantas**. Informações Agronômicas Nº 134 – junho/2011. Disponível em: <[http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/66D3EE234A3DA5CD83257A8F005E858A/\\$FILE/Page14-20-134.pdf](http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/66D3EE234A3DA5CD83257A8F005E858A/$FILE/Page14-20-134.pdf)>. Acesso em 10 de junho de 2017.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Poços artesianos**. – Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=104>>. Acesso em 11 de setembro de 2016.

SAMOHYL, Robert Wayne. **Controle estatístico da qualidade**. 275 pg. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SANTOS, M. A. P. F.; VICENSOTTI, J. E MONTEIRO, R. T. R. **Sensitivity of Four Test Organisms (*Chironomus xanthus*, *Daphnia magna*, *Hydra attenuata* and *Pseudokirchneriella subcapitata*) to NaCl: an Alternative Reference Toxicant**. Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology, v.2, pg. 229-236 - Rio Grande do Sul, 2007.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 1270 pg. 4 ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

SIA - Semiconductor Industry Association. **Global Semiconductor Sales Increase 1.5 Percent in Third Quarter**. Dezembro/2015. Disponível em: <https://www.semiconductors.org/news/2015/11/02/global_sales_report_2015/global_semiconductor_sales_increase_1.5_percent_in_third_quarter/>. Acesso em 31 de março de 2017.

SIA - Semiconductor Industry Association. **Semiconductors by the Numbers**. (2017). - Disponível em: <<https://www.semiconductors.org/>>. Acesso em 02 de abril de 2017.

SIA – Semiconductor Industry Association. **Worldwide sales increase for ninth straight month; Americas continue to lead growth**. Published Friday 2014 - Disponível em: <http://www.semiconductors.org/news/2014/01/03/global_sales_report_2013/global_semiconductor_sales_continue_to_climb_in_november/>. Acesso em 14 de maio de 2015.

SILVA, Davinson Mariano da. **Fabricação e caracterização de guias de onda baseadas em filmes finos e vidros de óxido de metal pesado dopados com Er³⁺ e Yb³⁺ e contendo nanopartículas metálicas para aplicações em dispositivos fotônicos**. – Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. – 242 pg. ed. rev. – São Paulo, 2013.

SILVA JÚNIOR; Eronides F. da. - **Rede cooperativa para pesquisa em nanodispositivos semicondutores e materiais nanoestruturados (NanoSemiMat)** - Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Nanociência e Nanotecnologia, 2002.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; HARLAND, Christine; HARRISON, Alan; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 526 pg. São Paulo: Atlas, 1999.

SOUZA, Danielle Maia de; LAFONTAINE, Mia; CHARRON-DOUCET, François; BENGUA, Xavier; CHAPPERT, Benoit; DUARTE Fernanda; LIMA, Luis. **Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context** - Journal of Cleaner Production 89 - 165 e 173 - Elsevier, 2015.

SOUZA, Líria Alves de. **Íons**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/ions.htm>>. Acesso em 11 de setembro de 2016.

SOUZA, C.C. de; PADULA, L.; SILVA, L.F.; IRAZUSTA, Sílvia P. **Validação dos Bioensaios de Toxicidade como Adjuvantes no Monitoramento de Efluentes para Descarte**. Ecotoxicol. Environ. Contam., v. 8, n. 2, 2013, 01-07 - doi: 10.5132/eec.2013.02.001. - ECOTOX – Brasil, 2013.

SWART, Jacobus W. **Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações**. 374 pg. - Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

TABAK, Y; KARA, M; GÜNAY, E; YILDIRIM, S. T.; YILMAZ, Ş. **CERAMIC TILE WASTE AS A WASTE MANAGEMENT SOLUTION FOR CONCRETE**. ResearchGate - Conference Paper - Jan. 2012. 3RD International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management – Crete, 2012.

TAVARES, Jorge Abel dos Santos Silva. **Toxicidade de nanomateriais de ácidos poliacrílicos hidrofobicamente modificados**. Dissertação de Mestrado em Biologia Aplicada – Ecotoxicologia. 52 pg. - Departamento de Biologia - Universidade de Aveiro, 2014.

TÉGULA Soluções para Telhados - **Folheto Técnico Tradição, Double S e Plana** – Disponível em: <<http://www.tegula.com.br/site/pdf/folheto-tecnico-Telha-Tegula.pdf>>. Acesso em 26 de março de 2016.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Materiais para equipamentos de processo**. 6. Ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

TIGRE, Paulo Bastos. **Gestão da inovação: a economia da tecnologia do Brasil**. 7ª Reimp. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

UFRGS - Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - **Princípio de Arquimedes - Empuxo**. – UFRGS, 2003. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20022/Jeferson/Arquimedes-1.htm> Acesso em 22 de setembro de 2017.

UNEP - United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry, and Economics - **Eco-Efficiency** – Disponível em: <<http://www.unep.fr/scp/cp/understanding/concept.htm>>. Acesso em 13 de janeiro de 2016.

WINGE, Manfredo; ALVARENGA, Carlos J. S.; PIMENTEL, Márcio M.; et al., 2001 - 2016. **Glossário Geológico Ilustrado**. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acesso em 14 de janeiro de 2016.

WSTS - World Semiconductor Trade Statistics - **FORECASTS THE SEMICONDUCTOR MARKET TO MAINTAIN STEADY GROWTH UNTIL 2017. Worldwide Semiconductor Market is expected to grow moderately in 2016 and 2017. WSTS Semiconductor Market Forecast Autumn 2015**. From the autumn 2015 Forecast Meeting, held in Hong Kong, November 17 to 19, 2015.

APÊNDICE A - Reaproveitamento de resíduos na composição de artefatos de concreto

INPI	Título	Descrição	Data do Depósito	Data da Publicação	Titular	Local
PI0401392-1	Processo de Fabricação de Telha Prensada e Produto Resultante	Refere-se ao processo que utiliza materiais considerados poluentes da natureza, como o resíduo ou lixo proveniente da fabricação de papel, conhecido como lodo de celulose <i>in natura</i> , que é agregado ao resíduo do carvão mineral <i>in natura</i> , utilizando-se simultaneamente no processo proposto o cimento de alta resistência inicial e um aditivo acelerador de pega e impermeabilizante, pelo que, o produto resultante, ou seja, a telha prensada destina-se na construção civil à cobertura de edificações em geral, produzindo-se a telha prensada com espessura aproximada de 10 mm, nas cores preta ou cinza escuro, sendo uma de suas faces lisa e a outra face com reentrâncias e ressaltos de estruturação, apresentando a telha prensada fator de absorção em aproximadamente 15% e resistência à flexão em aproximadamente 750 N, podendo as suas faces receber tinta poliéster ou esmalte sintético.	20/05/04	01/08/06	Carlos Alisson Castanheira Rabello	BR/SP
PI1005910-5	Blocos de Cerâmicos Acústicos (Ressoadores) Elemento Estrutural Obtido com Adição de Lodo Industrial	A presente invenção refere-se à determinação do coeficiente de absorção sonora de bloco cerâmico acústico e à utilização de um método de fabricação de bloco cerâmico acústico (ressoador), por meio da técnica de solidificação/estabilização de resíduo sólido gerado em indústrias têxteis, obtendo-se um produto denominado bloco cerâmico acústico (ressoador cerâmico), para aproveitamento na construção civil.	05/11/10	26/02/13	Universidade de Maringá	BR/PR
BR102013021540-6	Método de Incorporação de Lodo de Tratamento de Efluentes Industriais para Produção de Cerâmica Vermelha.	Consiste na utilização de dois resíduos industriais com significativa presença de metais pesados e que são misturados com argila utilizada na fabricação de materiais cerâmicos (tijolos, telhas e outros). Também incorpora a adição de cinzas como elemento regulador de umidade da mistura. A presença de elemento a base de vidro na formulação favorece a redução da temperatura de sinterização, desenvolvendo estrutura não cristalina a baixa temperatura e contribuindo para a incorporação e interação química dos metais pesados na fase vítrea. Dessa forma, esses elementos não são identificados nas análises realizadas, principalmente nos ensaios de lixiviação, caracterizando o material obtido como inerte frente as especificações estabelecidas na legislação vigente. A contribuição ambiental obtida é a utilização dos resíduos como matéria-prima em outro processo produtivo, que não o gerador, o prolongamento da vida dos depósitos de extração de argila e a redução nos custos de tratamento de resíduos pela(s) empresa(s) geradora(s) do(s) mesmo(s).	23/08/13	20/09/16	Leandro Wiemes	BR/PR

BR1020130 21271-7	Processo de Fabricação de Telhas Ecológicas	A presente invenção consiste na fabricação de um novo tipo de telha com atributo ecológico, pois além de ter baixo impacto para o meio ambiente e para os trabalhadores por não usar o tóxico amianto, possibilita o aproveitamento de um resíduo que vem sendo descartado para o meio-ambiente após o beneficiamento do rejeito da exploração da esmeralda para a retirada da molibdenita. Mais especificamente em um primeiro aspecto a presente invenção trata de um processo de fabricação de telha a partir de um compósito utilizando material descartado do beneficiamento do rejeito da lavra de esmeraldas que é seco e misturado com cimento, agregados leves e água, em proporções adequadas e que após compactação e cura, resulta em blocos ou tijolos com telhas com excelentes características de durabilidade, proteção térmica e resistências mecânicas. Em outro aspecto a presente invenção refere também à fabricação de telhas queimadas a temperaturas superiores a 400°C. A invenção tem potencial aplicabilidade na construção civil como um processo simples e de custo reduzido para a fabricação de telhas de baixo custo.	21/08/13	14/07/15	Cesar Luiz Paiva Correa	BR/ BA
BR1020140 31458-0	Incorporação de Resíduos Industriais para Produção de Massas Cerâmicas.	A patente de invenção diz respeito ao emprego dos resíduos oriundos do beneficiamento do caulim, chamote de telha e da cinza vegetal provenientes da indústria cerâmica e do resíduo de aciaria originado da indústria responsável pela produção de vergalhões de aço, incorporados em uma argila como matérias-primas constituintes de dez formulações de massas cerâmicas, a partir do estudo estatístico, tendo como auxílio o delineamento de mistura, em que os corpos cerâmicos confeccionados foram submetidos a quatro ciclos térmicos distintos, obtendo produtos com características de revestimentos cerâmicos na forma de placas prensadas, como também produtos da indústria de cerâmica estrutural.	02/12/14	07/06/16	Universid ade Federal do Rio Grande do Norte	BR/ RN
BR1020140 20224-2	Composto com Base Cimentícia para Impermeabilizar a Alisar uma Superfície e Processo para Obtenção de uma Superfície Lisa e Impermeável em Telha de Concreto.	Patente de Invenção para um composto impermeabilizante e hidrofugante, destinado ao campo de compostos para tratamento de superfícies rugosas tendo uma formulação com cimento branco, areia de quartzo, dolomita, retentor de água, superplastificante, agente antibolhas, hidrofugante, dióxido de titânio, rutilo, retardante de pega, acelerador de cura, pigmentos inorgânicos, a base de óxido de ferro, amarelo, vermelho e/ou preto, em dosagem específica que promove a fluidez do composto, cujo preparo para aplicação, adiciona o pó à quantia de água sobre o peso do produto em pó, misturados, com uso de agitador para dispersão e processo de aplicação do composto em campana de esmaltação sobre a telha de concreto, recém-moldada, com o concreto ainda úmido, após o qual, a telha revestida é levada a câmara de cura, a uma temperatura e umidade predefinidas, por um período entre 6 e 8 horas.	14/08/14	10/05/16	Wagner Magalhães Tarnakowski	BR/ SC

Fonte: Banco de dados do INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial - através do programa Espacenet - <https://pt.espacenet.com/?locale=pt_PT>. 01 de Junho de 2017 (Adaptado).

APÊNDICE B - Relatório de ensaio químico em água residuária do processo de corte de wafer de silício (ICP)



Relatório de Ensaio Nº QUVL-277.465/1/16
Página: 1/1

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº QUVL-277.465/1/16

INTERESSADO: ANTONIO SERGIO BREJÃO

Ref. (83446)

1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)

01 (Uma) Amostra de Água identificada pelo Interessado como: Amostra 01: Água residuária "processo de corte silício" e recebida pelo laboratório em 21/06/2016.
Identificação Interna: L-0204116

2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)

D-004-MTA / 03 – Análise química de metais por ICP/OES

3. RESULTADOS OBTIDOS

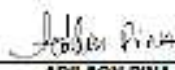
PARÂMETROS	RESULTADOS
Silício, mg/L	4,612
Sódio, mg/L	0,3056
Alumínio, mg/L	0,1095
Cálcio, mg/L	0,3933
Ferro, mg/L	0,0906
Magnésio, mg/L	0,0188

4. DATA DO(S) ENSAIO(S)

Ensaio realizado no período de 21/06/2016 a 30/06/2016.

São Paulo, 01 de Julho de 2016.

LA. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade


ANDERSON PINHEIRO

LA. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade


MARIANA PERES

APÊNDICE C - Relatório de ensaio químico em água descartada em efluente (ICP)



Relatório de Ensaio nº QUVL-277.465/2/16
Página: 1/1

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº QUVL-277.465/2/16

INTERESSADO: ANTONIO SERGIO BREJÃO

Ref: (83446)

1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)

01 (Uma) Amostra de Água Identificada pelo Interessado como: Amostra 02: Água para descarte em efluente e recebida pelo laboratório em 21/06/2016.
Identificação Interna: L-0204117

2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)

D-004-MTA / 03 – Análise química de metais por ICP/OES

3. RESULTADOS OBTIDOS

PARÂMETROS	RESULTADOS
Silício, mg/L	5,468
Sódio, mg/L	486,8500
Alumínio, mg/L	55,4950
Cálcio, mg/L	1,6405
Ferro, mg/L	0,0808
Magnésio, mg/L	0,1156

4. DATA DO(S) ENSAIO(S)

Ensaio realizado no período de 21/06/2016 a 30/06/2016.

São Paulo, 01 de Julho de 2016.

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

ADILSON PINA

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

KARINA CRUZ

APÊNDICE H - Ensaio de ruptura à flexão das telhas de concreto



Relatório de Ensaio nº CCC/279.288/16
Página: 1/3



Laboratório de Ensaio Acreditado pelo Cgcre de acordo com NBR ISO IEC 17025, sob o nº CRL 0003.
A Cgcre é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo do ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation.

RELATÓRIO DE N.º CCC/279.288/16

TELHAS DE CONCRETO ENSAIOS DIVERSOS

INTERESSADO: ANTONIO SERGIO BREJÃO

Ref.: (84.635)

1. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS FORNECIDA PELO INTERESSADO	
MATERIAL	• Telha de concreto
DESCRIÇÃO DA PRODUÇÃO DA TELHA	• AMOSTRA "A" - Telha de concreto produzida com lodo residual de silício
	• Produzidas em 22/06/2016
	• AMOSTRA "B" - Telha de concreto produzida com água residual de silício
	• Produzidas em 22/06/2016
MATERIAL ENTREGUE POR	• Interessado
QUANTIDADE DE MATERIAL ENTREGUE	• 07 CP amostra "A" e 07 CP amostra "B"
LOCAL DE ENTREGA DO MATERIAL	• Laboratório central
DATA DE ENTREGA DO MATERIAL NO LABORATÓRIO CENTRAL	• 12/08/2016

2. METODOLOGIAS UTILIZADAS

NBR 13858-2/2009 – Telhas de Concreto – Requisitos e métodos de ensaio – Anexo D – Determinação da Carga de Ruptura à Flexão.

3. EQUIPAMENTOS

Equipamento	N.º de FB	N.º Certificado Calibração	Validade
Máquina de ensaio de flexão	13303	R24505/16	05/2017

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquino, 111 - S.P. - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833 - FAX (11) 3611-0170

4. RESULTADOS DE ENSAIOS

4.1. Verificação da Carga de Ruptura à Flexão

AMOSTRA "A"			
CP n.º	CARGA DE RUPTURA À FLEXÃO (N)		
01	2 251		
02	1 542		
03	2 000		
04	1 906		
05	1 927		
06	1 906		
Requisitos NBR 13858/09	Classes	A	≥ 2 400
		B	
		C	≥ 2 000
		D	
		Plana	≥ 1 200

AMOSTRA "B"			
CP n.º	CARGA DE RUPTURA À FLEXÃO (N)		
01	2 515		
02	2 435		
03	2 317		
04	2 280		
05	2 420		
06	2 405		
Requisitos NBR 13858/09	Classes	A	≥ 2 400
		B	
		C	≥ 2 000
		D	
		Plana	≥ 1 200

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquino, 111 - S.P. - CEP 05035-070 - FONE (11) 3611-0833 - FAX (11) 3611-0170
 Filiais: SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro
www.falcao-bauer.com.br - fbauer@falcao-bauer.com.br

5. OBSERVAÇÃO

A título de informação segue as tabela 2 da NBR 13858 referente aos requisitos das classes do perfil.

Tabela 2 — Classe do perfil em função da profundidade da telha e da carga de ruptura à flexão


Classe do perfil	Profundidade do perfil (d) mm	Carga de ruptura à flexão N
A	$d \geq 50$	2 400
B	$40 \leq d < 50$	
C	$30 \leq d < 40$	2 000
D	$20 \leq d < 30$	
Plana	$d < 20$	1 200

6. DATA DOS ENSAIOS

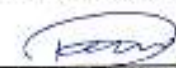
Ensaio realizado no período de 19/08/2016 a 23/08/2016.

São Paulo, 24 de agosto de 2 016.

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
 Centro Tecnológico de Controle de Qualidade


ANTÔNIO FELISBINO FILHO
 COORDENADOR DO LABORATÓRIO
 Técnico em Edificações - CREA n.º 50521/78349

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
 Centro Tecnológico de Controle de Qualidade


PAULO DA SILVA SANTOS
 SUPERVISOR DO LABORATÓRIO
 Eng.º Civil - CREA n.º 50656/72430

UPR

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.