

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Gabriela Thomazi

**AVALIAÇÃO DE UM POTENCIAL REAPROVEITAMENTO
PARA O RESÍDUO DE ESCÓRIA DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO
DE FERRO PARA A INDÚSTRIA CONCRETEIRA**

Santa Maria, RS
2022

Gabriela Thomazi

**AVALIAÇÃO DE UM POTENCIAL REAPROVEITAMENTO PARA O
RESÍDUO DE ESCÓRIA DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO DE FERRO PARA A
INDÚSTRIA CONCRETEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Sanitarista e Ambiental**.

Orientador: Prof Dr. Elvis Carissimi

Santa Maria, RS
2022

Gabriela Thomazi

**AVALIAÇÃO DE UM POTENCIAL REAPROVEITAMENTO PARA O
RESÍDUO DE ESCÓRIA DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO DE FERRO PARA A
INDÚSTRIA CONCRETEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Sanitarista e Ambiental**.

Aprovado em 6 de dezembro de 2022:

Elvis Carissimi, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Siara Silvestri, Dra. (IFRS)

Fernanda Tamiozzo, Ma (UFSM)

Santa Maria, RS

2022

RESUMO

AVALIAÇÃO DE UM POTENCIAL REAPROVEITAMENTO PARA O RESÍDUO DE ESCÓRIA DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO DE FERRO PARA A INDÚSTRIA CONCRETEIRA

AUTORA: Gabriela Thomazi
ORIENTADOR: Prof Dr Elvis Carissimi

A empresa de fundição gera diversos tipos de resíduos sólidos, entre eles pode-se citar: a areia, escória e refratário de fundição que quando dispostos inadequadamente em contato direto com a natureza podem vir a causar diversos problemas. Entre os danos ambientais mais comuns estão a contaminação dos solos, ar e águas (superficiais e subterrâneas). A escória de fundição é gerada no processo de fusão do metal sendo formada principalmente pela sujidade aderida à matéria-prima. O aterro industrial não pode ser a única opção para a destinação desse resíduo, sendo desta forma, de grande importância o desenvolvimento de estudos aplicados voltados para o reaproveitamento destes resíduos como matéria prima para outros processos. A indústria da construção civil apresenta potencial para a utilização destes resíduos com a utilização de escórias de fundição em processos como: fabricação de concretos, pavimentações, cobertura em aterros e construção civil no geral. Desta forma, o objetivo do trabalho foi analisar o resíduo de escória de fundição e avaliar uma destinação alternativa. A metodologia consistiu na análise da composição química, física e ambiental, assim como o diagnóstico das etapas de geração. Os resultados indicaram que o beneficiamento do resíduo na finura 12,5mm possui um índice de atividade pozolânica de 56%, o teste para resistência a compressão resultou em 11,10MPa na mistura (cimento adicionado de resíduo) quando comparado com o cimento puro de 19,98 MPa. Já o teste de difração de raio X mostrou que 76,5% é de amorfismo, que sendo um resíduo sem forma definida, apresenta um excelente potencial como aglomerante hidráulico. Os resultados obtidos ainda não permitem estabelecer um destino seguro, porém a caracterização do resíduo analisado mostra que o mesmo possui potencial para reaproveitamento, no entanto, estudos adicionais são necessários para assegurar uma destinação sustentável, como por exemplo em substituição a matérias-primas na indústria cimentícia.

Palavras-chave: Escória de fundição. Reciclagem. Construção civil.

ABSTRACT

EVALUATION OF A REUSE POTENTIAL FOR THE SLAG RESIDUE OF AN IRON CASTING COMPANY FOR THE CONCRETE INDUSTRY

AUTHOR: Gabriela Thomazi
ADVISOR: Prof Dr Elvis Carissimi

The foundry company generates several types of solid waste, among them are: sand, slag and refractory casting that when improperly arranged in direct contact with nature can cause various problems. Among the most common environmental damage are contamination of soil, air and water (surface and groundwater). The casting slag is generated in the metal fusion process formed mainly by dirt adhered to the raw material. The industrial landfill cannot be the only option for the disposal of this waste, and thus, of great importance the development of applied studies aimed at the reuse of these residues as raw material for other processes. The construction industry has the potential for the use of this waste with the use of smelting slag in processes such as: concrete manufacturing, paving, landfilling and civil construction in general. Thus, the objective of this course completion work was to analyze the casting slag residue and evaluate a possibility of destination. The methodology consisted of the analysis of chemical, physical and environmental composition, as well as the diagnosis of the generation stages. The results showed that the processing of the residue in fineness 12.5mm has a 56% pozzolanic activity index, the test for compressive strength resulted in 11.10MPa in the mixture (cement plus residue) compared with pure cement of 19.98 MPa. While the X-ray diffraction test showed us that 76.5% is amorphism being a residue without defined form and can be an excellent potential of hydraulic binder. The results obtained do not yet allow establishing a safe destination, but the characterization of the residue analyzed shows that it has potential for reuse, however, additional studies are necessary for a sustainable destination, such as substitution to raw materials in the cement industry.

Keywords: Foundry slag and refractory. Recycling. Construction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	OBJETIVOS.....	8
1.1.1	Objetivo Geral	8
1.1.2	Objetivos Específicos	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	QUESTÃO AMBIENTAL.....	9
2.1.1	Resíduos sólidos industriais nas atividades de fundição	10
2.1.2	Escória de fundição de ferro	11
2.1.3	Aterros e outras destinações	13
2.2	A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	14
2.2.1	A situação brasileira da indústria de fundição	14
2.2.2	Características da escória de fundição	16
2.3	O PROCESSO DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO.....	16
2.3.1	Forno elétrico de fundição	18
2.3.2	Tipos de resfriamentos	20
2.4	CONDIÇÕES E OPORTUNIDADES DE REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO.....	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	DIAGNÓSTICO DAS ETAPAS DE GERAÇÃO DE ESCÓRIA	24
3.2	CARACTERIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ESCÓRIA (CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E AMBIENTAIS)	25
3.3	AValiação DE UMA ALTERNATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA.....	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	DIAGNÓSTICO DAS ETAPAS DE GERAÇÃO DE ESCÓRIA	28
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ESCÓRIA (CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E AMBIENTAIS)	31

4.3	AVALIAÇÃO DE UMA ALTERNATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA.....	41
5.	CONCLUSÃO	42
6.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

As empresas de fundição apresentam uma grande importância para o crescimento do país, pois, é a partir delas que se desenvolvem outras indústrias e processos, caracterizando-se como produtora de bens intermediários (MACIEL,2005; HERMENEGILDO,2011).

Apesar do setor industrial de fundição contribuir com o meio ambiente, consumindo alguns resíduos que podem ser utilizados como matérias-primas para as empresas do ramo, por outro lado, geram consideráveis volumes de resíduos sólidos não-metálicos, além dos efluentes (RESCHKE, 2003). O mesmo autor cita que entre os resíduos sólidos gerados no processo tem-se, a escória, os restos de refratário, as poeiras, e a areia de fundição.

Com isso, a poluição ambiental aumenta, e, se não devidamente destinados, esses resíduos podem poluir o solo, as águas (subterrâneas e superficial), e, o ar levando a um processo de deterioração ambiental (MISSIAGGIA, 2002). Entretanto, a primeira alternativa sempre será a não geração, não sendo possível utilizar desta, devemos pensar na reciclagem/reaproveitamento trazendo inúmeros benefícios para a indústria e o meio ambiente (QUISSINI, 2009).

No entanto, devemos ter uma visão do resíduo como potencial de agregação de valor, reaproveitando-o para reuso ou reciclagem (NETO, 2004). Ainda, o resíduo destinado a aterros industriais não pode ser considerado uma solução, visto que esse processo diminui a vida útil dos aterros e aumenta o custo final para a empresa com transportes e valores para destinações.

Nesse contexto, estudos vêm sendo realizados buscando-se alternativas para o reaproveitamento destes resíduos. Sua utilização beneficia tanto a construção civil, sendo utilizado como matéria-prima, como também o meio ambiente, preservando a extração de recursos naturais (ZAGO,2015). Conforme ZAGO (2015), a questão econômica da empresa também é beneficiada, pois livra-se de gastos necessários com a destinação a aterros, transportes e depósitos para armazenagens.

As escórias de fundição podem apresentar propriedades cimentícias, e serem utilizadas na construção civil como componente de argamassas e concretos devido à sua característica reativa (RESCHKE, 2003). Dessa forma, o objetivo geral do trabalho foi analisar, avaliar e

estudar alternativas para uma destinação sustentável visando o reaproveitamento do resíduo de escória de uma empresa de fundição de ferro.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar uma destinação sustentável, reaproveitando os resíduos de escória de uma empresa de fundição de ferro fundido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar o diagnóstico das etapas de geração de escória;
- b) Realizar a caracterização quali-quantitativa da escória (características físicas, químicas e ambiental);
- c) Avaliar uma alternativa de reaproveitamento da escória;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QUESTÃO AMBIENTAL

Na antiguidade o homem não se preocupava com a utilização dos recursos naturais gerando resíduos de forma acelerada, que eram descartados de qualquer forma, pois naquela época se tinha recursos em abundância e a natureza aceitava o recebimento desses resíduos (MOURA, 2002). Os resíduos gerados em seus processos produtivos eram descartados no meio ambiente, as águas e o ar eram vistos como fontes de diluição desses resíduos, sem a preocupação por parte da empresa com a degradação da saúde humana e impactos ambientais (SIMIÃO, 2011).

MACIEL (2005), comenta que, já na década de 60 o descaso com as emissões de poluentes começou a mudar. MACIEL (2005), continua afirmando que com o aumento da população e do consumo se iniciou um debate maior sobre a preocupação em relação ao esgotamento futuro desses recursos. Os anos 70 foram marcados pela Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, criando o desenvolvimento sustentável, social e econômico sem afetar a qualidade dos ecossistemas.

Na década de 80 no Brasil foi criada a lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõem sobre a política nacional do meio ambiente. Entende-se que, poluição ambiental é a degradação da qualidade ambiental que prejudique a saúde, segurança e o bem-estar da população, afetando as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente lançando matérias ou energias em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos; sendo o poluidor pessoa física ou jurídica responsável direta ou indiretamente por atividade causadora de degradação ambiental.

As questões ambientais vêm gerando maior relevância na sociedade considerando as últimas décadas, por isso o tema poluição ambiental está sendo abordado com maior frequência pelas pessoas (VIANNA, 2015). Atualmente, a sociedade e organizações estão buscando por métodos e ferramentas que gerem dos seus produtos e processos uma maior correlação com o meio ambiente, afirma LOPES et al., (2011). O autor explica sobre o termo sustentabilidade, que envolve gerenciar os estoques da natureza ou confirmar a sua reposição; utilizando os recursos de uma forma racional, evitando desperdícios e promovendo processos de reciclagem e recuperação.

MACIEL (2005), comenta que quanto mais alto o padrão de vida da sociedade, mais o ambiente sofre essa pressão; fazendo uso dos ecossistemas naturais, fontes não renováveis e até as fontes renováveis em uma velocidade bem acelerada, acaba comprometendo o meio ambiente, a qualidade de vida e o equilíbrio biótico. Com isso, as empresas têm se adequando a alternativas tecnológicas mais limpas, reduzindo o impacto e a degradação ambiental, a sociedade e as legislações ambientais têm demonstrado mais interesse nessa relação meio ambiente e empresa (LOPES, 2011).

BRASIL (1998), já relatava que é de extrema importância a sociedade como um todo ter um olhar de preocupação e cuidado com a preservação do planeta, visto que isso afeta diretamente na qualidade de vida das pessoas, e tudo isso está relacionado com a degradação ambiental e ao fator de poluição praticado através de cada pessoa. Além do mais, os consumidores estão cada vez mais exigentes e preocupados com o meio ambiente, prestando mais atenção na empresa que produz seus produtos, os cuidados com seus resíduos gerados e impactos ambientais relacionados (RODRIGUES, 2018).

2.1.1 Resíduos sólidos industriais nas atividades de fundição

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) caracteriza resíduos sólidos como sendo materiais obtidos através de atividades humanas, e que são descartados quando não possuem mais utilidade para aquele processo ao qual foi originalmente planejado. GUIZILINI (2017), comenta que, deve-se ter muito cuidado ao se descartar os resíduos, pois quando são destinados de forma inadequada, estes podem gerar impactos ambientais significativos, degradando solos, águas, o ar e proliferando vetores.

RESCHKE (2003), afirma que os resíduos sólidos vêm se tornando um problema a muito tempo, devido à alta multiplicação e cada vez mais a dificuldade para disposição final.

A Resolução CONAMA 313/2002 define resíduo sólido industrial (RSI) como:

“Todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso -quando contido, e líquido -cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d`água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Incluindo lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição” (BRASIL, 2002).

Segundo a norma (ABNT, 2004), pode-se classificar os resíduos sólidos em Classe I- perigosos, Classe II- não perigosos, Classe IIA- não inertes e Classe IIB- inertes.

RESCHKE (2003) e BRAGAGNOLO et al. (2018), afirmam que na indústria de fundição, apesar de utilizar como matérias-primas materiais de sucatas metálicas já existentes no meio ambiente, também gera novos resíduos, sendo sólidos não-metálicos, efluentes líquidos e gasosos. Os resíduos sólidos produzidos pelo processo de fundição são, principalmente escórias, sobras de refratários, poeira e areia descartada (RESCHKE 2003).

A areia de fundição é um resíduo industrial gerado pelo processo de produção de moldes e machos na maioria das empresas de fundição (SILVA et al., 1999). Esse processo de moldagem é utilizado pela maioria das empresas de fundição em todo o mundo, confeccionando moldes que formam faces externas de peças fundidas (WATANABE et al. (2002).

Já a escória de fundição é gerada no processo de fusão de metal para a produção de peças de ferro fundido (CECCATTO, 2003). A quantidade de escória gerada vai depender do tipo de carga dos materiais que estão fundindo, da sujidade presente na matéria-prima, impurezas aderidas a carga e também a areia que pode estar presente (CECCATTO, 2003).

Com isso, atualmente as empresas estão valorizando a área de gestão dos resíduos, identificando oportunidades para o seu reaproveitamento, possibilidades de reciclagem, descobertas por novos produtos com uso de seus componentes em busca de uma tecnologia mais limpa e sustentável para suas empresas (MISSIAGGIA, 2002). A fim de preservar o planeta, assegurar que as atividades fundamentais para a vida prevaleçam, mantendo um equilíbrio sustentável (CECCATTO, 2003).

2.1.2 Escória de fundição de ferro

TIECHER (2019), explica que os principais resíduos e em maior volume gerado no processo de fundição Figura 1, são areia de fundição e escória de fundição. O volume gerado de escória está ligado ao processo empregado na empresa e nas matérias-primas utilizadas (GUMIERI, 2002).

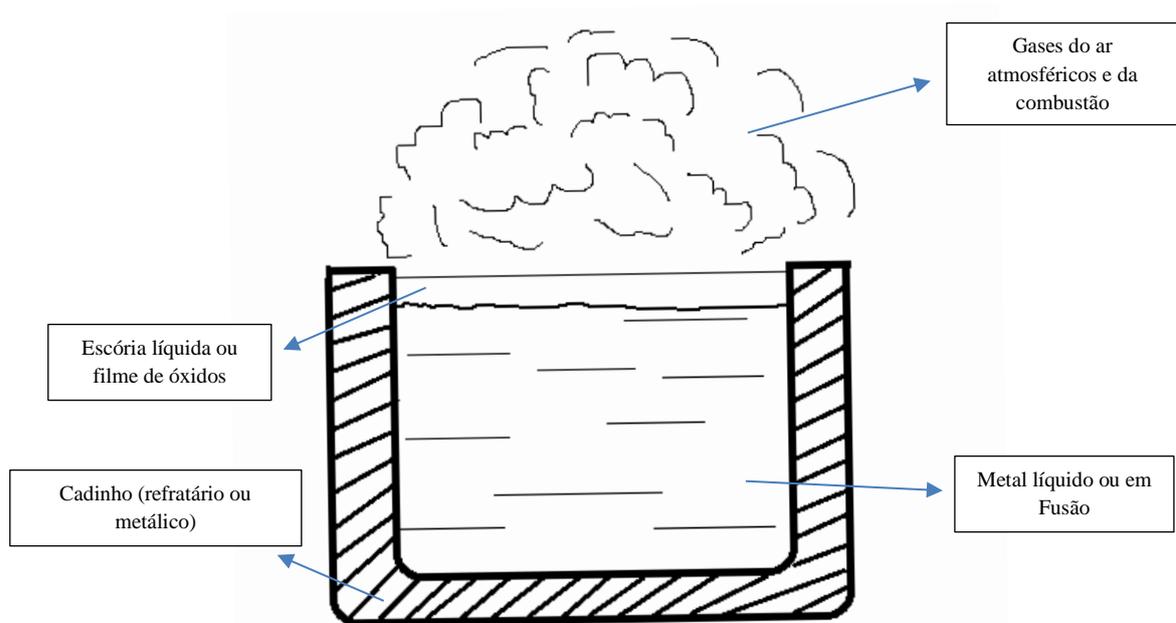
A escória surge a partir do processo de fabricação de peças de ferro fundido com propriedades metalúrgicas e dimensões definidas. É gerada na fusão de sucatas de ferro fundido e ferro-gusa, no momento em que se resfria e se solidifica (TIECHER, 2019; CECCATTO, 2003). No forno de fusão, a escória separa-se do metal líquido por ser menos densa, contendo

a escória propriedades insolúveis, sendo formada também por um líquido homogêneo quando quente e é composta por componentes químicos e com vários óxidos (LÚCIO, 1981).

Conforme CASPERS (1999), existe uma relação direta entre a qualidade do ferro fundido produzido e a escória gerada. O autor afirma fortemente que a escória deverá conter o mínimo possível de óxidos de ferro e manganês, absorver o enxofre, não prejudicar o aumento de carbono e danificar, o mínimo possível, o refratário sem causar incrustações.

A escória possui principalmente em sua formação os elementos de: Al_2O_3 , SiO_2 e CaO (UEHARA, 1996). Estes componentes estão presentes pelo desgaste do refratário e da areia aderente aos materiais no caso da alumina e sílica, e no caso do CaO pela adição de calcário (LOPES, 2022).

Figura 1- Panela refratária de fundição do metal com geração de escória



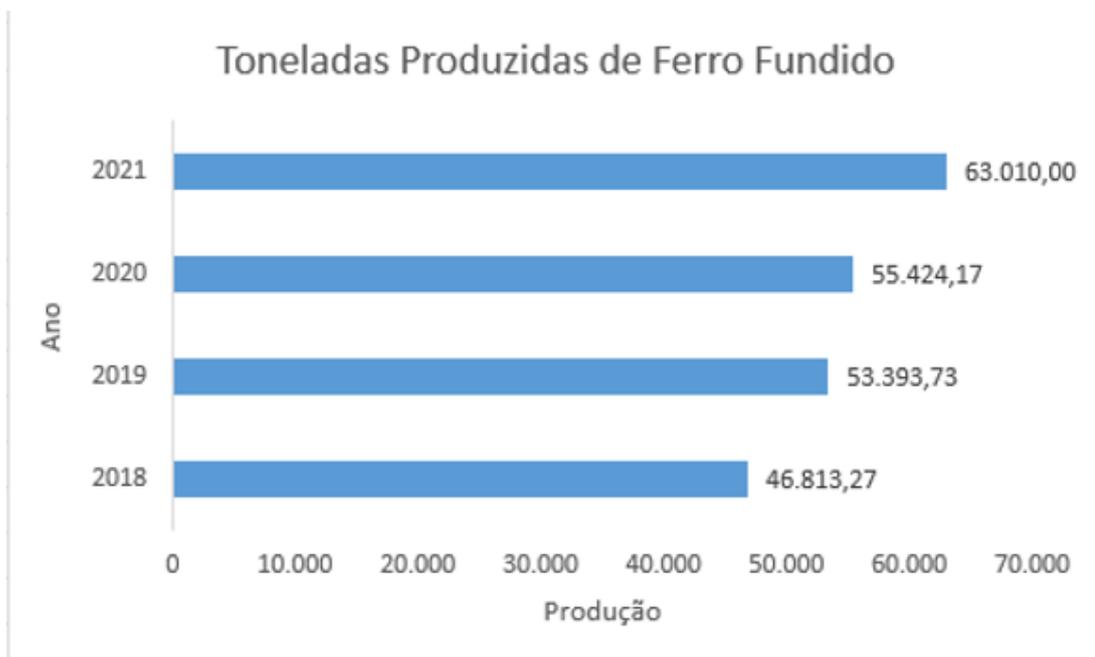
Fonte: adaptado de LEONEL; (2013).; BRUNO et al., (2019).

2.1.3 Aterros e outras destinações

A maior parte dos resíduos sólidos em geral são destinados a aterros sanitários e aterros industriais no Brasil (QUISSINI, 2009). Em torno de 40% são materiais perigosos quando nos referimos a aterros industriais e estes necessitam de cuidados especiais (TOCCHETTO, 2009).

Os impactos ambientais estão diretamente relacionados com o aumento do consumo da população conforme Figura 2, quanto maior a demanda, maior será a extração da matéria-prima e crescerá a geração de resíduos eliminados (GUIZILINI, 2017). Com isso, temos uma alta na produção das indústrias e fábricas, para abastecer essa necessidade humana e como consequência um grande desafio para uma destinação ambientalmente correta e segura visando assegurar a saúde pública, necessitando de inovações e tecnologias para uma destinação que busca uma maior sustentabilidade (FIN et al., 2018).

Figura 2- Produção em toneladas de ferro fundido da empresa de fundição Castertech



Fonte: Castertech adaptado (2022).

Conforme NETO (2004), estudos vêm sendo realizados para a reutilização de alguns insumos em pavimentações asfálticas por exemplo, visto que é necessário grande volume de materiais e estes são extraídos da natureza, não sendo bens renováveis. Com isso, NETO (2004) ainda afirma, que a fim de encontrar uma destinação mais adequada para os resíduos e preservar

o meio ambiente, existem pesquisas para reutilizar resíduos sólidos de várias origens como: borrachas de pneus, resíduos celulósicos e escórias.

Além disso, os resíduos também podem ser utilizados como agregados em construção civil no suporte de estruturas, como vigas, lajes, pilares e muros, quando apresentarem propriedades que suportem esforços e desgastes. No geral, os agregados são normalmente materiais inertes, granulares, sem formas e dimensões. (NETO, 2004; RESCHKE, 2003).

2.2 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição é composto pelas fases de fusão do metal, ou seja, transformação do metal sólido para o estado líquido, e em seguida ele é vazado para um molde pré-estabelecido e quando o metal líquido se solidificar tem-se uma peça em seu formato desejado (HERMENEGILDO, 2011). O mesmo autor ainda ressalta que, dependendo do tipo de material utilizado para fundir podemos ter a classificação de ferrosa e não ferrosa (alumínio, cobre, latão e bronze). A empresa de fundição é de suma importância pois ela representa o desenvolvimento de produtos como uma empresa de bens intermediários, fornecendo peças fundidas para diversas outras empresas (MACIEL, 2005).

No ano de 2007 o Brasil produziu 7 milhões de toneladas de fundidos, em um cenário mundial ocupou o sétimo lugar em produção, em primeiro lugar se destacou a China (QUISSINI, 2009). E para alcançarmos toda esta produção necessitamos de diferentes tipos de máquinas e equipamentos precisando de peças metálicas, que são fabricadas em processos de fundição (MACIEL, 2005).

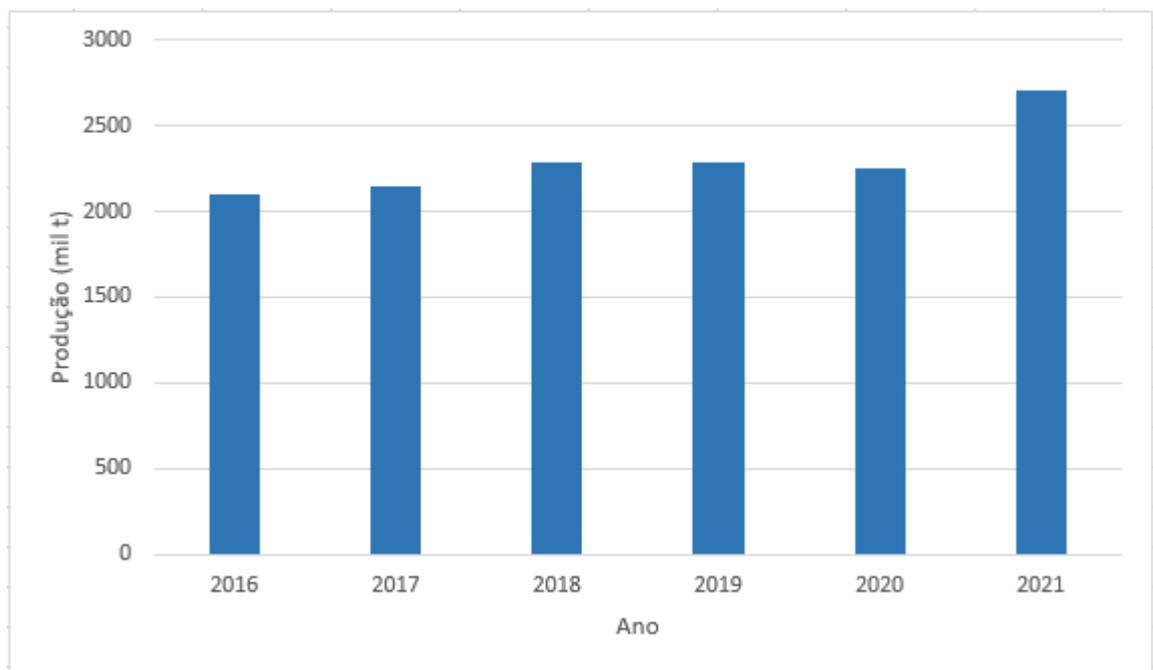
2.2.1 A situação brasileira da indústria de fundição

O Brasil é um país rico para matérias primas da indústria de fundição, apresentando grandes quantidades de minérios de ferro, minerais em geral, bentonitas e outros que moldaram as indústrias como são hoje (GOMES, 1996). Grande parte das empresas são de pequeno e médio porte, girando o capital nacional e, garantindo independência do mercado externo (SCHEUNEMANN, 2005).

A ABIFA (Associação Brasileira de Fundição, 2020) afirma que, nos anos anteriores a 2020 as empresas de fundição tiveram aumento significativo em suas fundições conforme Figura 3, totalizando 2,28 milhões de toneladas em 2019. Com um crescimento de 8,8% em

relação a 2016, 6,5% sobre 2017 e de 0,8% em relação a 2018. A ABIFA (2020) comenta ainda que, o volume de produção alcançado no acumulado de 2021 (2,70 milhões de toneladas) superou em +8,25% a previsão da ABIFA, que estimava em 2,50 milhões toneladas o desempenho do setor em 2021.

Figura 3- Gráfico da produção anual de fundidos no Brasil



Fonte: adaptado, ABIFA (2022)

Em 2021, as empresas de fundição cresceram de 20 a 30%, mesmo com dificuldades enfrentadas com negociações e ofertas dos insumos GONZAGA (2021). O autor segue informando que, a empresa de fundição é de extrema importância para o país, visto que é neste setor que se inicia o processo de que todas as outras empresas necessitam. ABIFA (2022), comenta que, no acumulado do ano de 2022, janeiro a setembro, o setor produziu 2,112 milhões toneladas. O volume corresponde a um crescimento de +10,4% no comparativo com o mesmo período de 2021.

MACIEL (2005) diz que, essas empresas geram muitos resíduos que podem ser perigosos para o meio ambiente se não devidamente descartados, podendo vir a contaminar solos e o lençol freático. O autor complementa que, por conta disto as empresas necessitam de estudos para minimizar estes resíduos ou encontrar uma destinação sustentável para eles,

eliminando possíveis custos com seus resíduos como também formando um mercado amplo de competitividade.

Por isso, os autores CECCATTO (2003), RESCHKE (2003), PAGNUSSAT (2004) e TIECHER, F. et al (2019) realizaram pesquisas a respeito do reaproveitamento do resíduo de escória de fundição na construção civil. Trazem com seus estudos algumas possibilidades da inserção deste resíduo como um reaproveitamento sustentável na matéria-prima e com inovações dentro do segmento da construção civil.

2.2.2 Características da escória de fundição

A escória é gerada a partir da sujidade aderida na matéria-prima, como por exemplo o óleo, a presença de areia dos retornos, a matéria que não se funde e o produto escorificante que é utilizado para facilitar a formação da escória e sua retirada do forno (LOPES, 2022). Quanto maior for a presença dessas sujidades, mais rígida, pesada e de difícil remoção será esse produto, por outro lado, o contrário também é válido, quanto mais limpa for a matéria-prima menos escória será formada (LOPES, 2022).

RESCHKE (2003), analisou o resíduo de escória em relação a granulometria e dimensões; quimicamente em relação à presença e quantidade dos elementos que compõem a escória; e dos componentes ambientais foi verificado o possível impacto ambiental que esse resíduo poderia causar ao ambiente se utilizado com matéria-prima para outro processo.

2.3 O PROCESSO DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

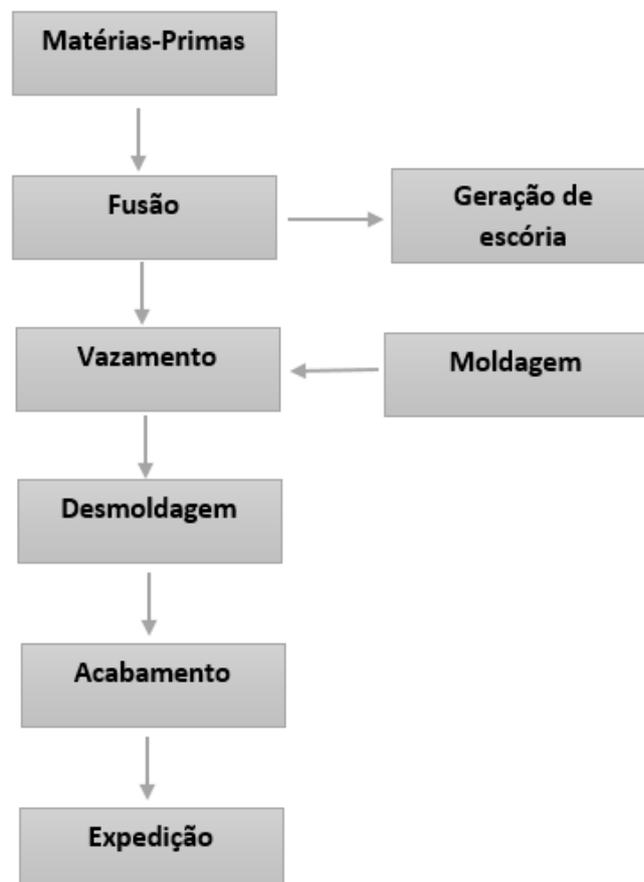
O processo de fundição é o aquecimento do metal até que ele se funda e em seguida o seu vazamento em moldes pré-determinados, para a formação de peças (KONDIC, 1973). A indústria de fundição consiste na atividade de fabricar peças fundidas de metais; esse processo ocorre com o metal fundido escorrendo através de moldes que apresentam uma forma desejada, em que o molde é a fase externa e o macho é a fase interna por onde percorre o ferro fundido, sendo normalmente utilizados moldes de areia (QUISSINI, 2009).

Conforme FILHO (1978), o processo de formação dos moldes pode diferenciar de empresa para empresa, sendo que no caso dos moldes em areia, constrói-se um molde para cada

peça a ser fundida e em seguida ele é destruído para remover-se a peça originada. E na fundição por pressão os moldes são permanentes, onde usa-se sempre o mesmo molde repetidas vezes.

A fundição é um processo simples e fácil apresentado na Figura 4, sendo capaz de se obter formas diversas, até moldes complexos por diversos tipos de metais (BRADASCHIA, 1981). A peça final é formada com a solidificação do metal em molde, que em contato com o fogo ou temperaturas elevadas não produza alterações significativas e que mantenha a forma do produto desenhado (RODRIGUES, 2018). Além disso, existem variáveis de extrema importância no processo de fusão do metal, como: a composição química do fundido, a temperatura do forno e a correção do produto (HERMENEGILDO, 2011).

Figura 4- Fluxograma básico demonstrando o processo de uma indústria de fundição



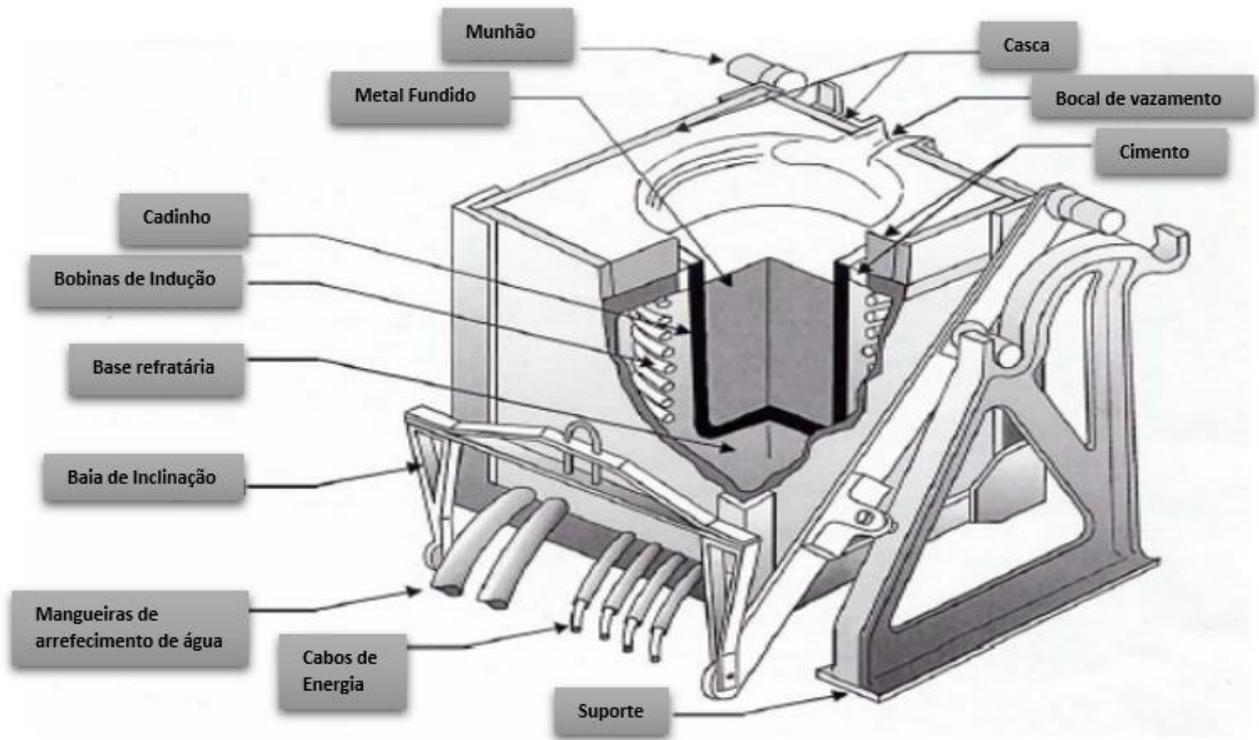
Fonte: Adaptado de NETO, (2004); HERMENEGILDO, (2011); RESCHKE, (2003); QUISSINI, (2009).

2.3.1 Forno elétrico de fundição

A finalidade de um forno é transferir calor, nesse processo gera-se uma fonte de calor que é transferido para o material desejado com o máximo de eficiência e uniformidade para todo o material proporcionando sempre a segurança (CUSA, 2018). O aquecimento ocorre através de correntes alternadas com uma bobina de cobre, essa corrente cria um intenso campo eletromagnético com uma densidade maior perto da superfície e que diminui em direção ao centro (OMORI, ORTEGA; 2006). Conforme CUSA (2018), os fornos mais utilizados pelas indústrias são os tipos arcos, os quais são formados por eletrodos especiais, esses eletrodos contém um mecanismo que mantém uma certa distância entre si para a formação do arco, e esse sistema é essencial pois os eletrodos se desgastam com o tempo consumindo o arco voltaico para o aquecimento, o que torna a distância um elemento essencial para uma maior vida útil dos arcos.

O forno elétrico a indução conforme Figura 5 é um equipamento importante em uma indústria de grande porte, mesmo sendo um dos equipamentos mais caros para o setor da fundição, ele eleva muito a capacidade de produção da empresa (JUNIOR, 2016). OMORI e ORTEGA (2006) explicam que, o aquecimento acontece através de uma indução eletromagnética em que o condutor elétrico é submetido a um fluxo magnético variável. Esse forno é indicado para fusão de materiais condutores, logo se os materiais a serem fundidos forem magnéticos, ocorrerá uma elevação grandiosa de temperatura (JUNIOR, 2016).

Figura 5- Demonstração de um forno a indução e seus componentes



Fonte: Adaptado de BCS, (2005)

Conforme FLORENTINO (2021), a eficiência dos fornos, diminui durante o seu processo de funcionamento por perdas que podem ser causadas naturalmente ou provocadas pelas características do processo utilizado. O autor reforça que, para minimizar essas perdas deve-se manter o equipamento em boas condições, principalmente quando se refere ao refratário. BRUNO (2019), explica que o refratário é o revestimento interno do forno, definido a partir do material a ser fundido. BRUNO (2019), complementa ainda que o refratário é o que separa a parede interna do forno da bobina de cobre, por onde passa uma corrente elétrica que gera o campo magnético para aquecimento.

2.3.2 Tipos de resfriamentos

MASUERO (2001), explica que a escória pode ser resfriada por três diferentes maneiras gerando características diferentes entre elas, estas podendo ser: resfriamento ao ar, resfriamento controlado com água e brusco com água ou ar. Sendo as mais utilizadas o resfriamento ao ar e o resfriamento brusco. ZAGO (2015), simplifica dizendo que existem duas grandes maneiras de resfriar a escória, lentamente ou rapidamente.

Com a utilização do resfriamento rápido com água, a escória escorre por um canal que contém água corrente, se solidifica rapidamente, obtendo-se um material com uma forma semelhante a uma areia grossa (UEHARA, 1996; CECCATTO, 2003; RESCHKE, 2003). Os autores comentam ainda que a escória formada pelo forno de fusão de ferros fundidos quando aplicado o resfriamento brusco torna-se um material amorfo (vítreo), ou seja, sem forma e sem organização cristalina em sua estrutura, sendo destinado para aterro industrial.

A escória com aplicação de resfriamento brusco possui muitas vantagens, entre elas a melhora nas condições de trabalho, fácil recuperação de metais, simplificação na sua destinação com um produto que também pode gerar lucros para a empresa quando utilizadas como matéria prima de outro estabelecimento (CECCATTO, 2003). O autor ainda complementa dizendo que a escória resultante deste processo pode ser chamada de escória granulada de fundição (EGF).

No resfriamento rápido, as moléculas da escória não têm tempo de formar cristais, as estruturas desorganizadas mantêm-se em um estado amorfo, e nesta condição a escória torna-se um produto interessante pois contém em seus elementos altos potenciais hidráulicos com propriedades cimentícias (PAGNUSSAT, 2004).

Conforme ZAGO (2015) e PAGNUSSAT (2004), o resfriamento lento ocorre, quando as escórias são resfriadas ao ar livre e armazenadas em estoques ou pilhas. Nesse caso, o arranjo molecular é formado por cristais, após serem resfriados, em função do tempo decorrente até o seu resfriamento completo. O autor complementa que a composição cristalina formada, possui baixo poder aglomerante hidráulico e, com isso uma baixa capacidade cimentícia.

2.4 CONDIÇÕES E OPORTUNIDADES DE REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO

A escória é um resíduo composto, em muitas empresas é produzido um volume consideravelmente grande e que possui alto potencial de reutilização na construção civil

(BRAGAGNOLO,2018). As empresas aproveitam em torno de 90% do total de resíduos gerados, com a sua reutilização interna ou venda para terceiros (ZAGO, 2015).

CECCATTO (2003) comenta em sua pesquisa que a reciclagem de materiais tem sido cada vez mais inserida nas empresas, em que o setor da construção civil se tornou o maior reciclador dos últimos tempos. CECCATTO (2003), ressalta que, a escória pode ser utilizada como uma matéria prima para o setor da construção civil, que além da importância ambiental agregada, é um excelente produto com alto desempenho técnico e econômico, substituindo matérias primas em estradas, concretos e cimento.

UEHARA e SAKURAI (1996), constataram que a escória resfriada lentamente possui propriedades semelhante com a da gelenita ($2\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$), que é um material também amorfo, utilizado para inibir difusões na interface da ferramenta de corte. A escória apresentou o mesmo desempenho no corte que a gelenita com um uso que prolonga a vida útil do equipamento.

KHAN e WAHHAB (1998), também verificaram em sua pesquisa que as escórias podem ser utilizadas em misturas asfálticas combinadas com agregados de calcário que melhoram a qualidade das rodovias, principalmente em climas áridos e bastante secos. Os autores também destacam que, o asfalto é de melhor qualidade, quando comparado com camadas executadas separadamente com escória ou calcário.

A escolha do destino da escória depende do tipo de resfriamento que recebem, possuindo características físicas distintas (RESCHKE, 2003). A autora explica que, quando lentamente resfriada, a escória é formada por cristais, que não apresentam uso como material cimentício, mas que podem ser utilizadas como agregado no concreto, asfalto e estradas. Porém, quando rapidamente resfriada, quando devidamente ativada, apresentam diversos usos por possuir propriedades cimentícias, formando aglomerantes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo, foi considerado apenas uma empresa de fundição de ferro fundido a qual funde alguns tipos de metais em seus fornos, como: ferro gusa, aço e ferro fundido. Foram realizadas visitas a empresa e coletas de amostras do resíduo de escória de fundição para realização dos testes laboratoriais e coleta de alguns dados como: setores que a empresa opera, quantidades de matérias-primas que entram e resíduos que saem durante os

processos, assim como outras informações que foram necessárias para o estudo. Atualmente, essa escória não tem aplicação, considerado como um resíduo, é destinado para o aterro industrial.

Os recipientes utilizados para a fundição de ferro são chamados de panelas, conforme Figura 6. Nesses recipientes as temperaturas para fundição de ferro são de aproximadamente 1500 °C. O ferro é fundido e a escória fica sobrenadante ao banho metálico, por apresentar menor densidade. Nos fornos são utilizados a substância escorificante, esta que possibilita uma melhor aglomeração do resíduo de escória. Na sequência os operadores das panelas retiram esta escória com pás e reservam ao lado da panela, logo após, esta escória é destinada para a caçamba conforme Figura 8 para o seu resfriamento lento ao ar. Um exemplo da panela quando já retirado todo o metal e resfriada, está representada na Figura 7. A escória apresentada na Figura 9 permanece na caçamba por um mês, sendo acrescido em seu volume total todos os dias, e ao final de 30 dias, essa escória é retirada e destinada ao aterro industrial com aproximadamente 200t/mês.

Figura 6- Panela em operação onde é feita a fundição do metal



Fonte: Autora (2022)

Figura 7- Panela já resfriada para descarte



Fonte: Autora (2022).

O resíduo sofreu beneficiamento (trituração) para serem realizados os testes laboratoriais. O beneficiamento e a substituição de 25% do resíduo nos testes seguiu referência de acordo com as normas utilizadas no trabalho e apresentados na Tabela 1 para cada teste realizado.

Foram realizadas as seguintes etapas:

3.1 DIAGNÓSTICO DAS ETAPAS DE GERAÇÃO DE ESCÓRIA

Através de visitas realizadas a empresa, e acompanhadas pelo operador ambiental e pelo engenheiro metalúrgico da unidade passamos por todos os setores e investigamos todas as entradas (matérias-primas) e saídas (resíduos). Com ênfase no setor de fusão do metal onde o resíduo de escória é gerado.

Todas as informações necessárias foram relatadas pelo técnico e engenheiro da empresa, sendo primeiramente anotadas para posterior a elaboração de um fluxograma com todos os setores e suas respectivas etapas. Neste fluxograma foi considerado também os balanços de massas com o principal foco na entrada de matéria-prima, saída dos resíduos no setor de fundição e saída do material bruto sendo o produto produzido.

3.2 CARACTERIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ESCÓRIA (CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E AMBIENTAIS)

Foram coletadas amostras do resíduo de escória de fundição na empresa e enviadas aos laboratórios para a realização dos testes. Os laboratórios responsáveis por cada análise estão apresentados na Tabela 1, assim como suas respectivas normas. A caracterização física, química e ambiental para fins de verificação e classificação do resíduo, foram realizados no período entre maio e outubro de 2022.

O resíduo, anteriormente a sua coleta, foi armazenado em um local abrigado de luz solar direta e ao tempo externo para evitar qualquer tipo de interferência em seus resultados laboratoriais. As amostras foram coletadas e isoladas com papel bolha e posteriormente alocadas em uma caixa de papelão, identificadas e enviadas para os laboratórios imediatamente após a coleta.

Tabela 1- Relação do tipo de testes, classificação, laboratório e normas utilizadas.

Tipo de Teste	Classificação	Laboratório	Norma
Classificação de resíduos	Ambiental	ISAM (UCS)	ABNT NBR 10004:2004
Agregados- Determinação da composição granulométrica	Físico	Portland	ABNT NBR 17054/2022
Determinação da massa específica e massa específica aparente	Físico	Portland	ABNT NBR NM 52/2003
Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland	Físico	Portland	ABNT NBR 5752/2014
Extratos Solubilizados	Ambiental	ISAM (UCS)	ABNT NBR 10006:2004
Extrato lixiviado	Ambiental	ISAM (UCS)	ABNT NBR 10005:2004
Difração de Raio X	Químico	LCMIC (UCS)	-
Determinação da resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos	Físico	Portland	ABNT NBR 7215/2019

Fonte: Autora (2022)

Figura 8- Local de armazenamento do resíduo na empresa



Fonte: Autora (2022)

Figura 9- Resíduo de escória de fundição



Fonte: Autora (2022).

3.3 AVALIAÇÃO DE UMA ALTERNATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA

A partir dos laudos emitidos pelos laboratórios, foi possível realizar um estudo e comparações em bibliografias para avaliar a utilização e reaproveitamento deste resíduo, para sua aplicação em processos já existentes na construção civil. Este resíduo apresenta potencial de reaproveitamento como matéria-prima em substituição ao cimento, dependendo das suas características físicas, químicas e ambientais. Foram realizadas pesquisas com duas empresas interessadas na utilização do resíduo, pertencentes a área concreteira.

As empresas foram visitadas e com a análise dos dados obtidos foi possível discutir e demonstrar que o resíduo pode ser utilizado como material agregador em seus processos, levando em consideração os possíveis interesses das empresas em incluir este resíduo na concreteira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIAGNÓSTICO DAS ETAPAS DE GERAÇÃO DE ESCÓRIA

Na Figura 10, são apresentados os setores de operação da empresa, a quantidade de matéria-prima que entra e é posteriormente fundida; como também as perdas dos resíduos ao longo das etapas dos processos.

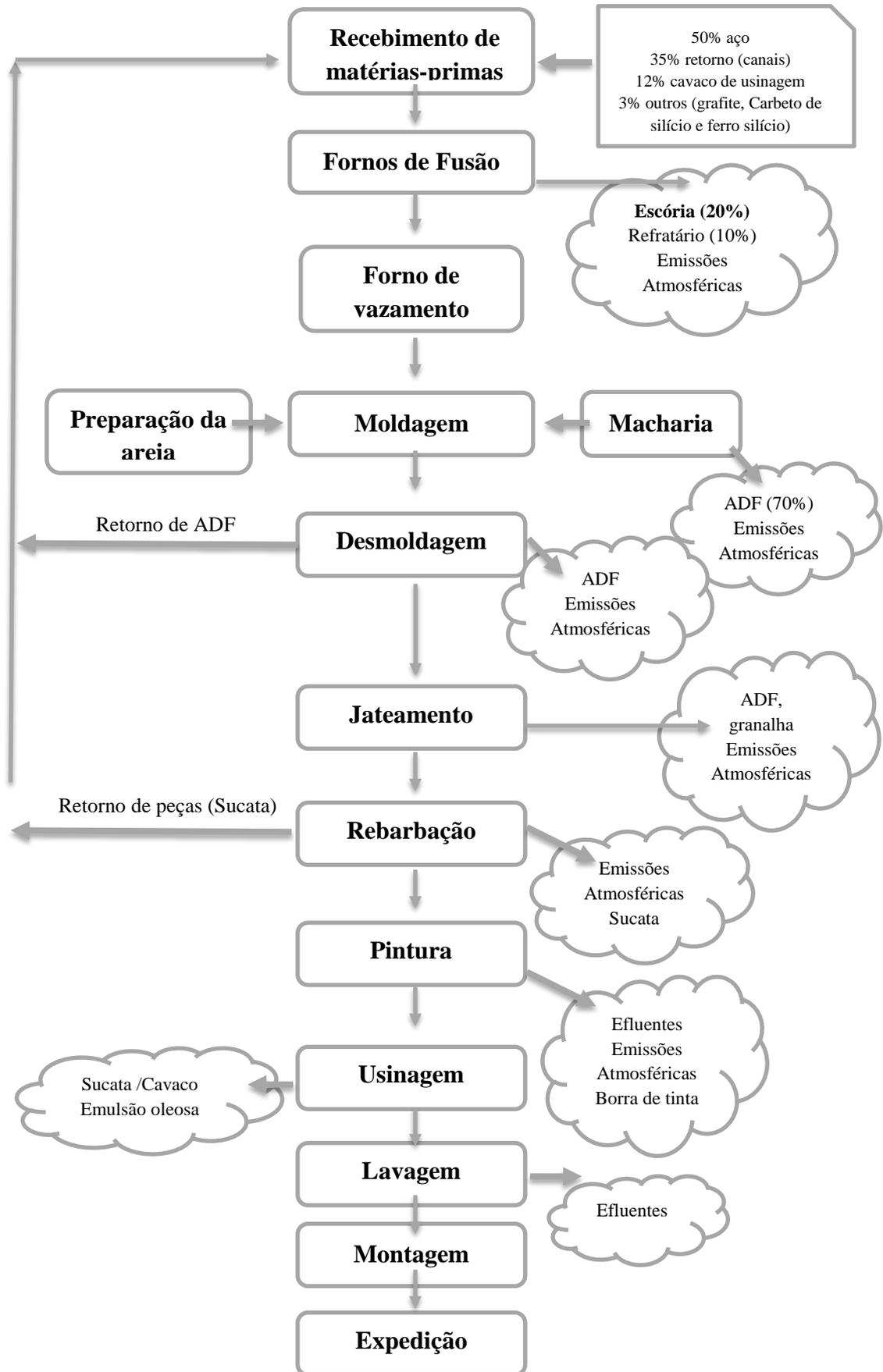
A entrada total de matéria-prima na empresa é equivalente a 260 t/dia. A empresa opera em 5 fornos de fusão, chamados também de panelas, com cada etapa de operação produzindo 104 panelas por dia com 2.500 kg cada.

Segundo dados fornecidos pela empresa estudada, tem-se como matérias primas do processo o aço com 50% do volume total de entrada, retorno dos canais com 35%, cavaco de usinagem com 12% e 3% de outros compostos utilizados para correção da composição do ferro fundido, como: carbono, silício, grafite natural, carbetto sílico, ferro manganês, ferro –cromo, estanho, cobre e pirita. Vale ressaltar que 80 a 90% da matéria-prima retorna da própria empresa e o restante na maioria das vezes é adquirido por sucateiros.

O resíduo de escória de fundição estudado é gerado no setor de fundição na etapa dos fornos de fusão, com geração de 20% de todo o resíduo da empresa. Considerando um balanço de massa temos 6,66 t/dia de escória gerada, sendo 10% refratário (3,33t/dia), com o maior volume na geração de areia de fundição, cerca de 70% do volume produzido (23,33 t/dia). Totalizando 33,32 t/dia de massa de resíduos. O volume dos outros resíduos gerados não foi considerado, pois apresentam uma pequena quantidade de geração.

Em relação ao produto bruto a empresa produz em massa 226,68 t/dia de ferro fundido.

Figura 10- Setores de operação da empresa de fundição



4.2 CARACTERIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ESCÓRIA (CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E AMBIENTAIS)

4.2.1 Caracterização Física

4.2.2 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para os testes de agregados a determinação da composição granulométrica foi realizada pelo laboratório Portland tecnologia: Laboratório de construção civil conforme a norma ABNT NBR 17054/2022.

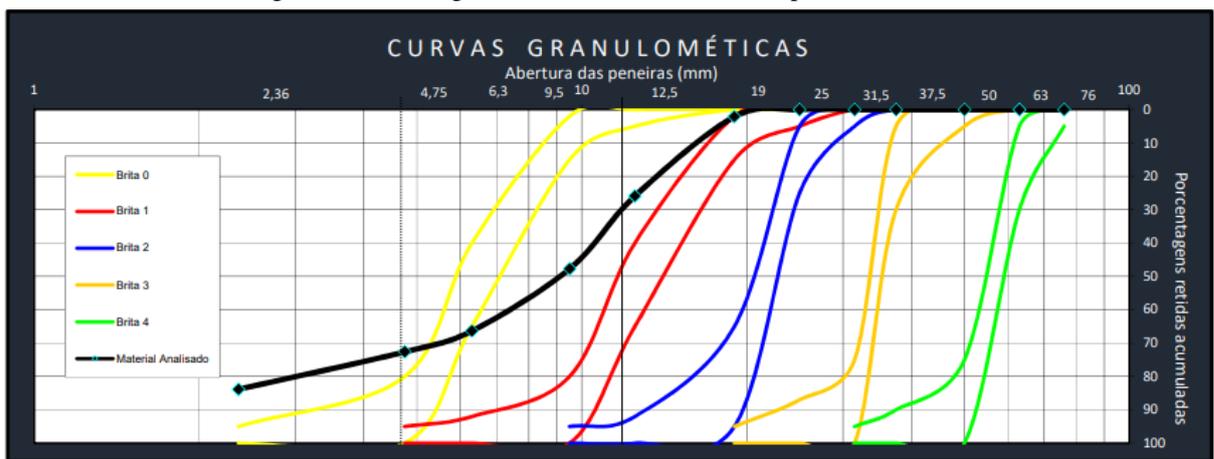
A composição granulométrica da escória, assim como o módulo de finura e dimensão máxima característica (mm) estão apresentados na Figura 11. Com resultados de 5,79% para o módulo de finura e 12,5 mm de dimensão máxima característica.

O módulo de finura é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em cada uma das peneiras da série normal, sendo a soma dividida por 100. Sabe-se que o valor do módulo de finura é tanto maior quanto mais graúdo for o agregado. Na Figura 12 tem-se a curva granulométrica do resíduo em comparação com a brita. Nota-se que o resíduo fica entre a brita zero e a brita 1.

Figura 11- Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica da escória

Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Media das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação as porcentagens retidas acumuladas						
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Brita 4,75 / 12,5	Brita 9,5 / 25	Brita 19 / 31,5	Brita 25 / 50	Brita 37,5 / 75		
						Nº 0	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4		
75	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%						0 - 5	
25	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%						5 - 30	
19	2,1%	2,1%	0,0%	2,1%	2,1%						0 - 5	75 - 100
12,5	23,6%	24,1%	0,5%	23,8%	25,9%						5 - 30	90 - 100
9,5	21,9%	21,7%	0,1%	21,8%	47,7%				0 - 5		75 - 100	95 - 100
6,3	18,7%	18,6%	0,1%	18,6%	66,3%			0 - 5	5 - 25		87 - 100	
4,75	6,3%	6,3%	0,1%	6,3%	72,6%			2 - 15	65 - 95		95 - 100	
2,36	11,0%	11,4%	0,4%	11,2%	83,8%	0 - 5	40 - 65	92 - 100				
1,18	5,2%	5,5%	0,3%	5,4%	89,2%	2 - 15	80 - 100	92 - 100				
0,6	3,1%	2,8%	0,3%	2,9%	92,1%	40 - 65	92 - 100	95 - 100				
0,3	2,4%	2,4%	0,1%	2,4%	94,5%	80 - 100	95 - 100					
0,15	2,3%	2,2%	0,1%	2,3%	96,8%	95 - 100						
Fundo	3,5%	2,9%	0,6%	Módulo de Finura = 5,79							Dimensão máxima característica (mm) = 12,5 mm	

Figura 12- Curvas granulométricas da escória comparado com brita



4.2.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Para os testes de determinação de massa específica foi utilizada a norma ABNT NBR 52/2003. A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis, enquanto a massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis. Conforme os resultados apresentados na Figura 13 a média da massa específica real do agregado miúdo é 2,689 g/cm³ e a média da massa específica aparente é de 2,716 g/cm³. Dessa forma, a determinação da massa específica é importante, pois é através dela pode-se calcular o consumo de materiais utilizados na produção das misturas.

Figura 13- Determinação da massa específica

ESCÓRIA				
AGREGADO - PASSANDO # N°4 - RETIDO # N°200				
REGISTRO	Fórmula	Am1	Am2	Am3
Massa do picnômetro vazio e seco (g):	A	130,40	128,80	130,80
Massa do picnômetro + amostra (g):	B	380,40	379,80	380,90
Massa do picnômetro + amostra + água (g):	C	798,90	820,90	806,00
Massa do picnômetro cheio de água (g):	D	641,10	663,20	649,20
Massa específica do agregado miúdo (g/cm³):	$D_r = \frac{(B-A)}{[(D-A)-(C-R)]}$	2,711	2,690	2,681
Temp. água (°C):		25,40	25,40	25,40
Correção água:		0,999	0,998	0,998
Massa esp. real do Ag. miúdo (g/cm³):	$D_r \times \text{corr. K20}$	2,708	2,685	2,675
Média Massa esp. real do Ag. miúdo (g/cm³):			2,689	
Massa específica aparente do agregado miúdo (g/cm³):		2,727	2,716	2,705
Média Massa específica aparente (g/cm³):			2,716	

4.2.4 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Os testes de índice de atividade pozolânica seguiram a NBR 5752/2014, sendo conduzidos pelo laboratório Portland. A partir deste teste, foi possível verificar se o resíduo de escória de fundição tem potencial de reagir com o cimento Portland, para que possa substituir parte do cimento em argamassas ou concretos na indústria concreteira.

Os resultados apresentados pelo laboratório, com a determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias estão demonstrados na Figura 14. Logo, com este ensaio foi possível concluir que, o resíduo possui 56% de índice de desempenho com o cimento Portland, onde este deveria ser superior a 75% segundo a norma ABNT NBR 12653/1992, para assim poder ser utilizado como material pozolânico. Sendo assim, este resíduo não é considerado um material pozolano não satisfazendo o mínimo requerido pela norma.

Figura 14- Determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias

FcB (Argamassa com CP WW-F-32 + Escória)	FcA (Argamassa referência) somente CP II-F-32	Icimento
11,10 MPa	19,89 MPa	56%

I é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

fcB é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25 % de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

fcA é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa).

4.2.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

O teste foi realizado pelo laboratório Portland, a fim de se entender o comportamento do resíduo perante a resistência a compressão comparado com o cimento Portland. Resultado exposto na Figura 15. Verificou-se que com média das resistências nas 4 amostras analisadas, o cimento puro contém 19,98 MPa e com a adição do resíduo a resistência diminuiu para 11,10 MPa. Com esse resultado conclui-se que, a adição de 25% da massa do resíduo de escória para a realização do teste fez com que diminuísse muito a resistência a compressão, não sendo indicado a utilização deste material em substituição ao cimento.

Figura 15- Determinação da resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos

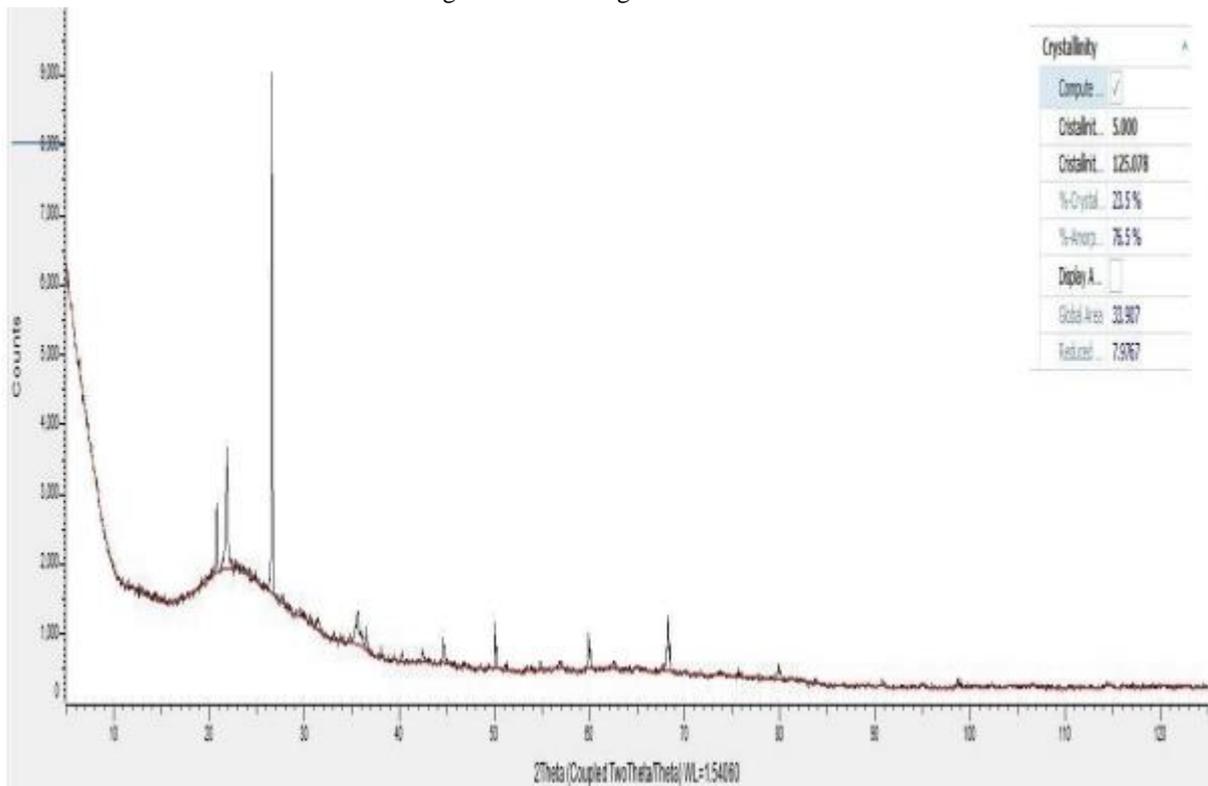
Análise	Cimento	Resíduo de escória
Amostra 1- Resistência a compressão (Mpa)	19,9	11,5
Amostra 2- Resistência a compressão (Mpa)	19,6	10,5
Amostra 3- Resistência a compressão (Mpa)	19,9	10,8
Amostra 4- Resistência a compressão (Mpa)	20,5	11,6
Amostra média- Resistência a compressão (Mpa)	19,98	11,10

4.2.6 Caracterização Química

4.2.7 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O teste de classificação química de difração de raios X, foi realizado pelo laboratório LCMIC (Laboratório Central de Microscopia) da UCS. Na Figura 16, tem-se a estrutura química do resíduo e seus dados qualitativos. Verificou-se que o material apresenta um comportamento halo amorfo no difratograma, indicando um grau de amorfização deste material. O difratograma mostra que o resíduo de escória possui uma porcentagem de 23,5% de cristalinidade e 76,5% de amorfismo. A estrutura amorfa indica que o material não teve tempo suficiente para os átomos se arranjam de forma ordenada, não possuindo uma estrutura química bem definida, pois quanto mais amorfo o material for, maior será o seu potencial hidráulico. Apesar do material apresentar pontos de cristalinidade, o amorfismo ainda é predominante. Com isso, mesmo o resíduo sendo resfriado lentamente e teoricamente possuir tempo suficiente para formação de cristais, na prática, a partir do teste de laboratório através da difração do raios X, verificou-se que ele apresenta em sua estrutura um alto poder de se aglomerar com o cimento.

Figura 16- Difratoograma da escória



4.2.8 Caracterização ambiental

Os testes de caracterização ambiental são de suma importância para entendermos a classificação do resíduo quanto a sua periculosidade e seus compostos envolvidos. Os testes realizados para a escória de fundição foram segundo a NBR 10005 (1987) e NBR 10006 (1987), que determinam extratos lixiviados e solubilizados respectivamente, e para a classificação do resíduo segundo a NBR 10004 (2004). O resíduo foi beneficiado (triturado e peneirado) em uma peneira de malha 9,5 mm para os testes de caracterização ambiental, segundo as normas de classificação de resíduos mencionadas anteriormente sendo um resíduo 100% composto por partículas sólidas.

4.2.9 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

Para os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais dos parâmetros analisados no extrato lixiviado seguindo os limites máximos no extrato lixiviado estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004/2004- Anexo F.

Analisando os resultados apresentados na Figura 17, verificou-se que nenhum dos parâmetros analisados no extrato lixiviado apresentaram concentrações acima dos limites estabelecidos no Anexo F da Norma (NBR 10.004/2004).

Figura 17- Resultados das análises laboratoriais e limites máximos definidos pela norma ABNT NBR 10004/2004, para extrato lixiviado

Parâmetros	Unidade	Extrato Lixiviado	
		Resultado Análise	Limite máximo no Extrato Lixiviado (ABNT NBR10.004/2004)
Arsênio total	mg/L	0,0052*	1,0
Bário total	mg/L	0,0299	70,0
Cádmio total	mg/L	0,0019*	0,5
Chumbo total	mg/L	0,0120	1,0
Cromo total	mg/L	0,8780	5,0
Fluoreto	mg/L	0,697	150,0
Mercurio total	mg/L	0,0015*	0,1
Prata total	mg/L	0,0093*	5,0
Selênio total	mg/L	0,0099*	1,0

4.2.10 ENSAIO DE SOLUBULIZAÇÃO

Para os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais dos parâmetros analisados no extrato solubilizado foi seguido os limites máximos estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004/2004- Anexo G. Com relação aos resultados obtidos, para os parâmetros analisados no extrato solubilizado, em duplicata, identificou-se que os parâmetros Alumínio total e Ferro Total na amostra A e B, encontram-se acima dos limites estabelecidos no Anexo G, da referida norma. Onde o limite para o parâmetro do alumínio é de 0,2mg/L e na amostra do ensaio A o resultado foi de 0,7140mg/L e na amostra do ensaio B foi de 0,8630mg/L. Para o parâmetro do ferro o limite é de 0,30mg/L e os resultados ficaram entre 0,4413 para amostra do ensaio A e 0,3695 para a amostra do ensaio B, sendo assim estes acima do limite permitido, resultados apresentados na Figura18.

Figura 18- Resultados das análises laboratoriais e limites máximos definidos pela norma ABNT NBR 10004/2004, para extrato solubilizado

Parâmetros	Unidade	Extrato Solubilizado Amostra A	Extrato Solubilizado Amostra B	Limite máximo no Extrato Solubilizado (ABNT NBR 10.004/2004)
		Resultado Análise Laboratorial	Resultado Análise Laboratorial	
Alumínio total	mg/L	0,7140	0,8630	0,2
Arsênio total	mg/L	0,0052*	0,0052*	0,01
Bário total	mg/L	0,0193	0,0211	0,7
Cádmio total	mg/L	0,0019*	0,0019*	0,005
Chumbo total	mg/L	0,0076*	0,0076*	0,01
Cianeto total	mg/L	0,010*	0,010*	0,07
Cloreto	mg/L	2,77*	2,77*	250
Cobre total	mg/L	0,0073*	0,0073*	2,0
Cromo total	mg/L	0,0044*	0,0044*	0,05

Parâmetros	Unidade	Extrato Solubilizado Amostra A	Extrato Solubilizado Amostra B	Limite máximo no Extrato Solubilizado (ABNT NBR 10.004/2004)
		Resultado Análise Laboratorial	Resultado Análise Laboratorial	
Fenol	mg/L	0,007*	0,007*	0,01
Ferro total	mg/L	0,4413	0,3695	0,30
Fluoreto	mg/L	0,722	0,792	1,5
Manganês total	mg/L	0,1400**	0,0950*	0,1
Mercúrio total	mg/L	0,00100*	0,00100*	0,001
Nitratos	mg/L	0,04*	0,04*	10,0
Prata total	mg/L	0,0093*	0,0093*	0,05
Selênio total	mg/L	0,0099*	0,0099*	0,01
Sódio total	mg/L	2,8256	2,8726	200,0
Sulfatos	mg/L	2	1*	250,0
Surfactantes aniônicos	mg/L	0,267*	0,267*	0,50
Zinco total	mg/L	0,0528	0,0391	5,0

4.2.11 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO

Após a realização dos testes dos ensaios de extratos de lixiviação e solubilização e seus parâmetros analisados, seguindo o fluxograma que consta na ABNT NBR 10004/2004- Resíduos sólidos- classificação de título: Figura 1- Caracterização e classificação de resíduos sólidos, foi possível obter a classificação do resíduo como Classe IIA- não inerte, resultado demonstrado na Figura 19.

A classificação classe II A- não inerte significa que o resíduo pode ainda ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. As análises para caracterização e classificação do resíduo apresentado na Figura 20, demonstra resultados negativos para inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. A classificação do resíduo se deu a partir das análises pelo extrato solubilizado com dois parâmetros apresentando limites superiores ao estabelecido pela norma, sendo o ferro e o alumínio.

Figura 19- Classificação do resíduo



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
AGÊNCIA DE INOVAÇÃO - UCSINOVA
INSTITUTO DE SANEAMENTO AMBIENTAL



5 CONCLUSÃO

Considerando os resultados dos parâmetros analisados e constantes nesse relatório, para a amostra de escória de fundição caracterizado, o mesmo é classificado como **Resíduo Não Inerte - Classe II A**.

6 RESPONSÁVEL TÉCNICA

DENISE

PERESIN:95134794049

Assinado de forma digital por
DENISE PERESIN:95134794049
Dados: 2022.08.17 16:14:22 -03'00'

Denise Peresin
CRBio 045302/03-D
Responsável técnica - RT

Figura 20- Caracterização e classificação do resíduo

Periculosidade	Características	Resultados
Inflamabilidade	Não líquida, não produz fogo por fricção a temperatura de 25°C (pressão 1 atm); Não apresenta ponto de fulgor $\leq 60^{\circ}\text{C}$;	Não inflamável
Corrosividade	pH > 2 e $< 12,5$; Resíduo não aquoso e não líquido.	Não corrosivo
Reatividade	Não explosivo; Estável; Não gera gases e vapores.	Não reativo
Toxicidade	Atendimento ao anexo F. Nenhuma substância consta como C e apresenta toxicidade.	Não tóxico
Patogenicidade	Resíduo não oriundo de serviço de saúde, não é suspeito de conter: micro-organismos patogênicos, proteínas virais, ADN, ARN, organismos geneticamente modificados, plasmídeos-cloroplastos, mitocôndrias ou toxinas.	Não patogênico

4.3 AVALIAÇÃO DE UMA ALTERNATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA

A partir dos laudos emitidos pelos laboratórios foi possível a caracterização do resíduo e a sua melhor compreensão. Com as análises, verificou-se que o resíduo é considerado não perigoso possuindo a possibilidade de inseri-lo no meio ambiente sem qualquer tipo de contaminação. Entretanto, para definição do reaproveitamento é necessário beneficiar este material. Muitas vezes, dependendo do tipo de aplicação é necessário cominuí-lo, como o caso da indústria cimentícia, ou fazer estudos adicionais de razões de misturas para aplicações em blocos ou telhas cerâmicas, por exemplo. No caso de aplicações em pavimentos, é necessária uma caracterização em termos de potencial de abrasão, compactação entre outros.

5. CONCLUSÃO

Buscou-se, através desta pesquisa, compreender melhor o resíduo de escória gerado pela empresa de fundição, com a análise das características físicas, químicas e ambientais possibilitando sua avaliação. A partir destes testes realizados, foi possível verificar pelo teste de Difração de Raio X que o resíduo tem alto potencial hidráulico, mostrando que sua mistura pode se tornar um aglomerante hidráulico com o cimento. Já no teste da atividade pozolânica o índice de desempenho com o cimento Portland ficou em 56%, onde este deveria ser maior ou igual a 75% segundo a Norma NBR 12653/1992, para se ter um potencial de material agregador. Também foi analisado a resistência a compressão, com resultados de 19,98 MPa do cimento puro 11,10 MPa da mistura (resíduo 25% mais cimento), a resistência ficou com um valor bem abaixo quando comparado com a resistência pura do cimento, não sendo indicado a utilização em substituição ao cimento por perda de resistência a compressão. O resíduo foi classificado em classe II A- não inerte, estando dentro dos limites para os parâmetros dos testes de lixiviação, e contendo os parâmetros Alumínio total e Ferro total alterados nos testes de solubilização. Com esta pesquisa, foi possível compreender melhor o resíduo, entender como ele se comporta a partir de alguns testes e ampliando as pesquisas para a continuação do projeto. Sendo assim, é possível encontrar uma solução para o resíduo de escória da empresa de fundição analisada, dando continuidade ao estudo e evitando o custo de destino deste resíduo para um aterro industrial.

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste item seguem algumas sugestões para as pesquisas futuras, utilizando a escória de fundição desta empresa obtida a partir do resfriamento lento ao ar. Baseado nos resultados:

- finura ideal da escória, pois os testes foram realizados com uma finura considerada alta para a possível substituição ao cimento, sendo necessário realizar testes com finuras mínimas e repetição de todos os testes com este tamanho de granulometria;
- porcentagens de substituição do resíduo diferentes de 25%, testando diversas porcentagens de substituição como: 5%, 10%, 15% e outras, repetindo-se todos os testes novamente;

- testar também para uso na pavimentação, através dos testes: ensaio de abrasão de “Los Angeles”(NBR NM 51:2001), Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 089/94), Solo- ensaio de compactação (ABNT NBR 7182/2016) e índice de suporte Califórnia (ISC) (ABNT NBR 9895/2017);

-uso como agregado compactador para aterros sanitários;

-utilização na indústria cerâmica.

REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004- Resíduos sólidos- Classificação**. Maio, 2004, 77 p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776- Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Março, 1987, 3 p

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054- Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Junho, 2022, 5 p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006- Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Maio, 2004, 3 p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005- Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Maio, 2004, 16 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52- Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Jul, 2003, 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653- Materiais Pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752- Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215- Determinação da resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos** Rio de Janeiro, 2019.

ABIFA DIVULGA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO CONCRETIZA FIM DA CRISE E TEM MELHOR ANO DESDE 2016. In: ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). São Paulo, 2019. Disponível em: <[Indústria de fundição concretiza fim da crise e tem melhor ano desde 2016 – ABIFA](#)>. Acesso em: 14 nov. 2022.

ABIFA DIVULGA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO CRESCE +20,3% EM 2021. In: ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). São Paulo, 2022. Disponível em:< [Indústria de fundição cresce +20,3% em 2021 – ABIFA](#) >. Acesso em: 14 nov. 2022.

ABIFA DIVULGA PRODUÇÃO DE FUNDIDOS TEM NOVO INCREMENTO EM 2019. In: ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). São Paulo, 2020. Disponível em:< [Produção de fundidos tem novo incremento em 2019 – ABIFA](#)>. Acesso em 14 nov. 2022.

ABIFA DIVULGA DESEMPENHO NA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO SEGUE EM ALTA SUPERIOR A +10% EM 2022. In: ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). São Paulo, 2020. Disponível em:< [Desempenho da indústria brasileira de fundição segue em alta superior a +10% em 2022 – ABIFA](#)>. Acesso em: 14 nov. 2022.

ABIFA- Associação Brasileira de Fundição. **Fundição e matérias-primas**. Revista oficial da associação brasileira de fundição. Ano XXIV dezembro 2021, nº 241, São Paulo.

AZEVEDO, J. L. A economia circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2015. **Anais...** Disponível em: <[Juliana Laboissiere de Azevedo ARTIGO CNEG 2015 1-with-cover-page-v2.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>. Acesso em: 07 dez. 2021.

BCS, Incorporated. **Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry**. 2005.

BRADASCHIA, C. et al. Fundição de ligas não ferrosas. **ABM -Associação Brasileira de Metais**. 3ª ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e editora ltda. 1981.

BRAGAGNOLO, L. et al. Caracterização de resíduos da fundição de ferro e avaliação de possíveis aplicações na construção civil. **RBCIAMB (Brazilian Journal Environmental Sciences)** n.50, p.61-77, Dez 2018.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Meio Ambiente**. Brasília: Ministério da Educação (MEC), 1998. 76 p. Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/meioambiente.pdf>>. Acesso em: 01 dezembro 2021.

BRASIL. Resolução 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõem sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder executivo, Brasília, DF, 31 ago.1981. 160º da Independência e 93º da República.

BRASIL. Resolução Conama nº313, de 29 de outubro de 2002. Dispõem sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 nov. 2002. Disponível em: <[Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002 \(siam.mg.gov.br\)](http://siam.mg.gov.br)>. Acesso em: 29 dez. 2021.

BRUNO, M.B. A et al. Análise do desempenho de adensamento da massa refratária de sílica usada em fornos de indução. **Cerâmica** 65, p.498-505. Joinville, SC,2019.

CASPERS, K.H. Fusão de ferro fundido sintético em forno cubilô. **Revista Fundição e Serviços**, São Paulo, março, 1999, p.34 - 44.

CASTERTECH. **Empresa de fundição**. Contato: SesmtCastertech@randon.com.br. Caxias do Sul, RS, 2022.

CECCATTO, D.M. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto- propriedades mecânicas**. 2003. Tese (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS,2003.

CUSA, Y.G. **Eficiência energética em empresa do setor de ferro-ligas**. 2018. Tese (Mestrado em engenharia industrial) -Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2018.

FILHO, M.P.D. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

FIN, E. et al. Panorama do coprocessamento de resíduos industriais com características de inflamabilidade no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 12.,2018, Gramado. **Anais...** Gramado: IBEAS, 2018. Disponível em:<<http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2018/XII-010.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2021.

FOSTER, A.; ROBERTO, S.S.; IGARI, A.T. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE. 2016. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ENGEMAUSP,2016. Disponível em: <engemausp.submissao.com.br>. Acesso em: 09 dez. 2021.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**. v. 143, n. 1, p. 757–768, 2017.

GOMES, M. T. O. et al. **Indústria brasileira de fundição**: segmento de peças para o setor automotivo. Junho de 1996.

GONZAGA, A. 2021- O ano ímpar da indústria brasileira de fundição. **Associação Brasileira de Fundição -ABIFA**, São Paulo, ano XXIV, n° 240, nov. 2021.

GUIZILINI, I. Viabilidade ambiental, técnica e econômica de reuso da areia descartada de fundição na produção de pavers. 2017. 69p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, 2017.

GUMIERI, A.G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

HERMENEGILDO, M.K. Determinação da concentração de metais presentes em areia verde de fundição: estudo de caso da fundição Tupy S.A. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

JUNIOR, M.T.C. Construção de um forno cadinho fixo de baixo custo para fundir metais não ferrosos. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas) -Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2016.

KHAN, M.I.; WAHHAB, H.I.A. Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag. **Construction and building materials** 12, Saudi Arabia, p.195-201,1998.

KONDIC, V. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. São Paulo: Polígono, Ed da Universidade de São Paulo.1973

LABORATÓRIO PORTLANT TECNOLOGIA. **Laboratório de construção civil**.

Contato: falecom@portlandtecnologia.com.br. Estrela, RS, 2022.

LABORATÓRIO LCMIC. **Laboratório Central de Microscopia Prof. Israel Baumvol – LCMIC**. Universidade de Caxias do Sul, RS, 2022.

LABORATÓRIO ISAM. **Laboratório ISAM- Instituto de Saneamento Ambiental**.

Universidade de Caxias do Sul, RS, 2022.

LEITÃO, A. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**, Portugal, Set, 2015. Disponível em: <[Economia circular-Uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI.pdf \(ucp.pt\)](#)>. Acesso em: 07 dez. 2021.

LEONEL, A.L. Análise sistêmica para seleção de isolamentos térmicos nos cadinhos de transporte de alumínio líquido. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)-Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, MG, 2013.

LOPES, C.H.R. Entrevista realizada em: 27 de jan. 2022. Contato: chrlopes@hotmail.com

LOPES, R. J. F. et al. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos como Técnica de Apoio a Gestão Ambiental e Industrial**. p. 1–15, 2011.

LÚCIO, A. Estrutura e Propriedades das Escórias. In: **Físico-química metalúrgica**, 2ª parte. Belo Horizonte: UFMG, 1981. cap.16, p.555-599.

MACIEL, C. B. **Avaliação da geração do resíduo sólido areia de fundição visando sua minimização na empresa metal corte metalurgia- Fundição**. 2005. Tese (Mestrado Engenharia Ambiental e Tecnologias limpas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

MASUERO, A.B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. Tese (Doutorado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

MENDES, I. **Diagnóstico do gerenciamento de resíduos industriais e perspectivas de aplicação de economia circular: um estudo de caso em São Carlos-SP**. 2020. Tese (Mestrado em Ciências: Engenharia hidráulica e saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2020.

MISSIAGGIA, R. R. **Gestão de resíduos sólidos industriais**. 2002. Tese (Mestrado em administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

MOURA, L.A.A. **Qualidade e Gestão Ambiental**. 3º edição, São Paulo: Editora Juarez de Oliveira, 2002.

NETO, B. C. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. Tese (Doutorado em engenharia de transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

OMORI, J.S.; ORTEGA, M.R. Estudo dos Impactos da Conexão de um Forno de Indução no Sistema de Distribuição. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BELO HORIZONTE/MG, 2006, Belo Horizonte/MG. **Anais...** Belo Horizonte/MG, 21 a 25 de agos. 2006.

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P.; IZELI, R. L. Reutilização de resíduo sólidos industrial, constituído por areia de fundição, na fabricação de tijolos maciços e peças decorativas. **Revista Risco**, São Paulo, p. 112-150, 2009.

PORTELLA, M. O; RIBEIRO, J. C, J; Aterro sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 4, n. 1, 2014 (p. 115-134).

PRESTON, F. A Global Redesign? Shaping the Circular Economy. **Chatham House**, London, Mar, 2012. Disponível em: <A_global_redesign_-_shaping_the_circular_economy-with-cover-page-v2.pdf(dlwqtxtslxzle7.cloudfront.net)>. Acesso em: 08.Dez.2021.

PRODUÇÃO DE FUNDIDOS TEM NOVO INCREMENTO EM 2019. In: ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). São Paulo, 2020. Disponível em: <[Produção de fundidos tem novo incremento em 2019 – ABIFA](#)>. Acesso em: 12 jan. 2022.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação da areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** 2009. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 2009.

RESCHKE, J. S. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição aos cimentos em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** 2003. Tese (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

RODRIGUES, G.M. **Viabilidade ambiental quanto a classificação para o uso de areia de fundição como agregado no concreto asfáltico.** 2018. Tese (Mestrado tecnologia ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, São Paulo, SP, 2018.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton.** 2005. Tese (Mestrado em engenharia química) - Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2005.

SILVA, R. C. P. et al. **Resíduos sólidos: tecnologias e boas práticas de economia circular.** 1.ed. Recife: EDUFRPE, 2018. 536p.

SILVA, S. N.; SILVA, A.S.; FRANKLIN, F.; LOMGO,E.; ANDRADE, R.M. Reciclagem da areia de fundição nos canais de corrida dos alto-fornos da CSC. In: XXX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGICA E MATERIAIS, 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG/Brasil,1999. p.609-623.

SIMIÃO, J. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa.** 2011. Tese (Mestrado em Hidráulica e saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

TIECHER, F. et al Avaliação do potencial de utilização da escória granulada de fundição em concreto autoadensável. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 73-88, jan./mar. 2019.

TOCCHETTO, M. R. L. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais:** apostila. Santa Maria: Departamento de química- Universidade de Santa Maria, 2005. 97p.

UEHARA, K.; SAKURAI, M. Application of foundry slag for metal cutting – performance as a diffusion inhibitor. **Journal of Materials Processing Technology** 62, Japan, p.435-439, 1996.

VIANNA, A. M. Poluição ambiental, um problema de urbanização e crescimento desordenado das cidades. **Revista Sustinere**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 22-42, jan-jun, 2015.

WATANABE, F.A.; GEMELLI, E.; FOLGUERAS, M.V. Utilização de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto, parte I: propriedades mecânicas e microestruturais do concreto. In: CONCRETO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS DO MERCOSUL- SULMAT, Joinville, SC/Brasil. **Anais...** Joinville, 2002. P. 833-841.

WEETMAN, C. **Economia Circular: Conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente sustentável e lucrativa**. 1. ed. São Paulo: Autêntica Business, 2019.

ZAGO, S.C. **Estudo do efeito da cristalinidade da escória de aciaria nas propriedades físico-química do cimento Portland CPIII**. 2015. Tese (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade de São Paulo, Lorena, SP,2015.