

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUANNA DI MARIO ROCHA

**EFEITO DO pH NA LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE DE
COMPOSTOS DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E
DE AGREGADOS DE FRESADO DE ASFALTO**

**PONTA GROSSA
2019**

LUANNA DI MARIO ROCHA

**EFEITO DO pH NA LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE DE
COMPOSTOS DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E
DE AGREGADOS DE FRESADO DE ASFALTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll.

**PONTA GROSSA
2019**

LUANNA DI MARIO ROCHA

**EFEITO DO pH NA LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE DE COMPOSTOS DA AREIA
DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E DE AGREGADOS DE FRESADO DE ASFALTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof.^a Dr.^a Lilian Tais de Gouveia

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Me. Rafael Jansen Mikami

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 04 de novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas, e sem seu amor e graça eu não estaria aqui.

À minha família, por sua paciência, suporte, amor e compreensão durante essa fase.

À professora Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll por sua dedicação, seu conhecimento e constantes desafios que me fizeram crescer nessa caminhada.

Ao professor Dr. Luiz Carlos Godoy, ao professor Me. Rafael Jansen Mikami e à professora Dr.^a Lilian Tais de Gouveia, por seu incentivo, sua disposição em colaborar e sanar minhas dúvidas.

Aos mestrandos Gabriel Biglia Wasilewski e Valdirene Aluiz, os quais contribuíram para esta pesquisa e sempre estiveram dispostos a me ajudar.

Aos demais professores que contribuíram para que essa pesquisa tomasse forma com seu conhecimento único e inestimável.

Aos laboratoristas Cícero e Elizir, pelo auxílio nos ensaios e análises.

Aos estagiários e colegas de laboratório que contribuíram no desenvolvimento das análises.

Aos colegas e amigos que foram suporte com suas palavras de incentivo e ânimo nos momentos mais desafiadores.

Ao Laboratório de Recursos Hídricos e ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu), pelo auxílio e realização de análises.

À Fundação Araucária e a Universidade Estadual de Ponta Grossa pelos recursos fornecidos.

A todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para que esse trabalho fosse concluído.

“It always seems impossible until it’s done.”
(Nelson Mandela)

RESUMO

O aumento da taxa de urbanização e industrialização levou a uma maior exploração dos recursos naturais e maior descuido no descarte de resíduos da construção civil, ampliando questões sobre a sustentabilidade dos processos construtivos atuais e da contaminação ambiental. A areia de fundição (ADF) é um resíduo gerado em grande quantidade na indústria de metais e que perde função após seu descarte, tornando-se um passivo ambiental. Já o fresado de asfalto é um resíduo proveniente pavimentação, que pode ser reciclado dentro da própria indústria, mas muitas vezes permanece em pilhas por muito tempo antes de ser reutilizado. Ambos os materiais passam pelo processo de lixiviação, no qual compostos presentes nos resíduos são solubilizados e levados para o solo e para lençóis freáticos próximos. Portanto, o objetivo dessa pesquisa foi analisar a influência do pH na liberação de sulfatos, cor e turbidez na água pela lixiviação (método 1) e solubilização (método 2) dos agregados, através de duas metodologias para as quais variou-se o pH (3,5, 7,0 e 10,0). Os materiais foram submersos em água por 24h para a lixiviação e por cerca de 84h para a solubilidade e o sobrenadante foi analisado quanto ao pH, condutividade elétrica, acidez, alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO), sulfatos, cor e turbidez. Realizou-se a caracterização física e de composição química dos materiais por meio de análise granulométrica, espectrofotometria de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (FEG). Para ambos os materiais, a cor e a turbidez tiveram seus valores máximos, os quais foram superiores aos observados para a água de controle, para o pH de controle alcalino (10,0), exceto para o fresado no método 1, onde o maior valor de turbidez foi para o pH de controle neutro (7,0). Para a ADF, no método 1 a cor chegou a 2,0 uH e a turbidez 6,4 uT, sendo esse valor acima do limite de 5,0 uT, estabelecido pela Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2018); já no método 2, os valores máximos obtidos foram, 1,37 uH para cor e 2,17 uT para turbidez. Para o fresado, no método 1, a cor chegou a 1,18 uH e a turbidez máxima foi de 0,54 uT; no método 2, os valores máximos foram de 4,10 uH para cor e 1,0 uT para turbidez, todos dentro dos limites normativos. Analisando os resultados de sulfato, os valores máximos foram obtidos para o pH de controle ácido (3,5), com exceção do resultado obtido para ADF no método 2, todos os outros foram superiores do que o teor de sulfatos obtido para o controle, mas nenhum resultado excedeu os limites da Portaria. Para ADF no método 1, o máximo valor de sulfato obtido foi 69,50 mg L⁻¹, no método 2, 50,6 mg L⁻¹ em comparação com o valor obtido para a água, de 62,3 mg L⁻¹. Para o fresado, o máximo valor obtido no método 1 foi 82,3 mg L⁻¹ e no método 2 foi de 87,2 mg L⁻¹. A Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde limita o teor de sulfato a 250 mg L⁻¹, portanto, esse parâmetro apresentou valores não preocupantes.

Palavras-chave: Areia de fundição, fresado de asfalto, lixiviação, solubilidade, contaminação ambiental.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma com as etapas realizadas nesse trabalho	28
Figura 2 - Areia Descartada de Fundição (ADF)	29
Figura 3 - Fresado de Asfalto (FA)	29
Figura 4 - Repartidor de amostras	30
Figura 5 - Curvas Granulométricas: Areia Descartada de Fundição	34
Figura 6 - Curvas Granulométricas: Fresado de Asfalto	34
Figura 7 - Gráfico de DRX para Areia Descartada de Fundição	36
Figura 8 - Areia Descartada de Fundição pelo microscópio eletrônico de varredura (FEG). ..	37
Figura 9 Gráfico de DRX para Fresado de Asfalto	38
Figura 10 Fresado de Asfalto pelo microscópio eletrônico de varredura (FEG). Em A, grãos angulosos de fresado de asfalto; em B, conformação angulosa e lisa de um único grão de fresado; em C, superfície rugosa de um grão de fresado; em D, superfície lisa de um grão de fresado.	39
Figura 11 – Analise da influência do pH de controle no sobrenadante da ADF no ensaio de lixiviação. Em A, pH; em B, sulfato; em C, acidez; em D, alcalinidade.	40
Figura 12 – Analise da influência da Areia Descartada de Fundição (ADF) e do pH de controle no sobrenadante do ensaio de lixiviação. Em A, condutividade elétrica; em B, turbidez; em C, cor.	41
Figura 13 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema S-H ₂ O a 25°C. pH ₂ S = 1,0 atm, concentração total de espécies contendo enxofre = 0,1 mol L ⁻¹	42
Figura 14 – Analise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de lixiviação. Em A, influência do fresado no sulfato; em B, influência do pH de controle no sulfato; em C, influência do fresado na turbidez; em D, influência do pH de controle na turbidez.	43
Figura 15 – Analise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de lixiviação. Em A, influência do pH de controle e do fresado no pH; em B, influência do pH de controle e do fresado na condutividade elétrica; em C, influência do pH de controle e do fresado na acidez; em D, influência do pH de controle na alcalinidade.	44
Figura 16 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Fe-H ₂ O a 25°C, [Fe ²⁺]=10 ⁴ mol L ⁻¹ , [Fe ³⁺]= 10 ⁻⁶ mol L ⁻¹	45
Figura 17 - Análises do sobrenadante do ensaio de solubilidade para ADF. Em A, pH; em B, condutividade elétrica; em C, acidez; em D, turbidez; em E, alcalinidade; em F, cor; em G, sulfato; e em H, demanda química de oxigênio (DQO).	46
Figura 18 – Analise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de solubilidade. Em A, influência do fresado no sulfato; em B, influência do pH de controle no sulfato; em C, influência do fresado na cor; em D, influência do pH de controle na cor.	47
Figura 19 – Influência do fresado e do pH de controle no sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de solubilidade. Em A, pH; em B, condutividade elétrica; em C, alcalinidade; em D, acidez; em E, turbidez; em F, DQO.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização Física da Areia Descartada de Fundição e do Fresado de Asfalto..	35
Tabela 2 – Resultados da análise de FRX em óxido para Areia Descartada de Fundição.	36
Tabela 3 - Resultados da análise de FRX em óxido para o Fresado de Asfalto.....	38
Tabela 4 – Comparação entre as metodologias para a Areia Descartada de Fundição	50
Tabela 5 – Comparação entre as metodologias para o Fresado de Asfalto	52

LISTA DE SIGLAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	Areia Descartada de Fundição
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FA	Fresado de Asfalto
IAP	Instituto Ambiental do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO	11
1.2	FRESADO DE ASFALTO.....	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	AREIA DE FUNDIÇÃO	14
3.2	FRESADO DE ASFALTO.....	18
3.3	LIXIVIAÇÃO DOS MATERIAIS	19
3.3.1	Areia Descartada de Fundação (ADF).....	19
3.3.2	Fresado de Asfalto (FA)	20
3.4	SOLUBILIDADE.....	21
3.5	PARÂMETROS FÍSICOS	22
3.5.1	Quadro resumo dos parâmetros estabelecidos pelo DNER-ME	22
3.5.2	Difração e Fluorescência de Raios-X	23
3.5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	23
3.6	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	24
3.6.1	pH.....	24
3.6.2	Cor	25
3.6.3	Turbidez	25
3.6.4	Condutividade elétrica	25
3.6.5	Alcalinidade	26
3.6.6	Acidez	26
3.6.7	Sulfato.....	26
3.6.8	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28

4.1	PREPARO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS	28
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	30
4.3	ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO (MÉTODO 1)	30
4.4	ENSAIO DE SOLUBILIDADE (MÉTODO 2)	31
4.5	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS	32
4.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS MATERIAIS	34
5.2	ANÁLISE DO EXTRATO LIXIVIADO (MÉTODO 1)	40
5.2.1	Areia Descartada de Fundação	40
5.2.2	Fresado de Asfalto	42
5.3	ANÁLISE DO EXTRATO SOLUBILIZADO (MÉTODO 2)	44
5.3.1	Areia Descartada de Fundação	44
5.3.2	Fresado de Asfalto	47
5.4	COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS	49
5.4.1	Areia Descartada de Fundação	50
5.4.2	Fresado de Asfalto	50
6	CONCLUSÕES.....	53
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
8	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

Estima-se que para uma tonelada de metal fundido gere-se em torno de uma tonelada de Areia Descartada de Fundição (ADF), a qual é utilizada especificamente no processo de moldagem de metais. Nesse processo, o metal líquido é vertido dentro da cavidade dos moldes e após solidificar, os moldes são submetidos a ação vibratória resultando no desprendimento da peça. Após alguns usos a areia perde propriedades fundamentais para seu bom desempenho como molde, resultando no seu descarte, que de acordo com a NBR 11.174, pode ser feito em aterros industriais desde que sejam seguidas as condições gerais estabelecidas pela norma. Entretanto, o material além de ser gerado em grandes quantidades apresenta frequentemente contaminação por arsênio, cádmio, chumbo, fenóis, mercúrio, sódio e outras impurezas advindas do processo ao qual ele é submetido (ABNT, 1990; DA SILVA *et al.*, 2011).

No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, INDÚSTRIA..., 2019), a produção de aço bruto nos três primeiros meses de 2019 foi de 8,4 milhões de toneladas, e analisando os dados mundiais de fundição, o Brasil é o décimo país na produção de metais, com uma produção de mais de 2 milhões de toneladas em 2017 (CENSUS..., 2018, p.24). Já conforme o inventário de resíduos industriais paranaense, entre os anos de 2004 e 2009 foram geradas mais de 24 mil toneladas de areia descartada de fundição no estado do Paraná (IAP, 2009).

Há uma preocupação crescente com o destino dos resíduos sólidos no país evidenciada pela Política Nacional do Meio Ambiente demonstrada na Lei Federal 12.305, que dentre seus objetivos, apresentados no Art. 7º, destacam-se os incisos I e II, que se referem à proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; e a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Se tratando da ADF, alguns estados brasileiros possuem resoluções próprias que não somente regulamentam o descarte de tal material, mas sugerem novas possibilidades de uso para ele, como é o caso do estado de Santa Catarina. Ele conta com resoluções regulamentadoras desde 2008, e teve publicada em 2013 a Resolução CONSEMA nº 26, que demonstra a viabilidade técnica e legal para a ampliação do uso das ADF no estado, como por exemplo, os listados no Art. 2º: em produção de concreto asfáltico, de concreto e argamassas para artefatos de concreto, implantação pioneira de rodovias, disposição final de rejeitos urbanos em aterros sanitários, fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro, assentamento de tubulações em sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário, entre outras alternativas. Outros estados

como Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais também apresentam resoluções para regular e incentivar a reutilização desse resíduo na construção civil. Infelizmente até o momento, o estado do Paraná não apresenta nenhuma resolução nesse contexto (CAMINHO..., 2014).

Em 2009 foi criada a NBR 15.702 (ABNT, 2009), em parceria com o Comitê Brasileiro de Fundição, que tem por função estabelecer “diretrizes para a aplicação de areias descartadas de fundição como matéria prima em concreto asfáltico e cobertura diária em aterro” como forma de incentivar o uso das ADF para outros fins (FAGUNDES; DA SILVA, 2011). Por mais que existam incentivos, os usos são poucos se comparado ao volume de resíduo gerado pelas fundições, e de acordo com Santos *et al.* (2016) é necessário estabelecer metodologias eficazes para o aproveitamento da areia descartada de fundição na engenharia civil através de trabalhos tecnológicos e científicos. Para tal resíduo, a reciclagem e a reutilização são opções de grande interesse, visto que visam substituir parcial ou totalmente matérias primas em processos já existentes.

1.2 FRESADO DE ASFALTO

De acordo com dados a Confederação Nacional de Transportes (CNT), cerca de 12,4% da malha viária brasileira é pavimentada (CNT, 2018), e destes, 99% é com pavimento flexível (CNT, 2017). Entretanto, esse material apresenta um ciclo de vida relativamente curto (6 a 30 anos), e por isso requer constante manutenção e restauração (PASCHE, *et al.*, 2018).

Uma das técnicas de manutenção e restauro utilizadas atualmente é a fresagem do revestimento asfáltico danificado para que seja refeito o trecho em questão. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2011) define esta operação como o corte ou desbaste de camada (s) do pavimento antigo realizada por processo mecânico, geralmente a frio. Esta facilidade aumenta a geração de material fresado, especialmente na área urbana, e que pode ser reaproveitado na própria pavimentação (DNIT, 2006).

Esse material é composto por agregados e ligante envelhecido e deve ser empilhado e armazenado até que possa ser reciclado ou deve ser encaminhado a um destino adequado de acordo com a Resolução CONAMA 307/2002. Quando bem triturado e processado, esse material constitui um agregado de boa qualidade para ser usado na pavimentação, e em sua maioria, o material fresado é reutilizado na indústria da pavimentação, apesar disso muitas vezes não ser feito no mesmo ano em que o resíduo é produzido (RAJU, *et al.*, 2010). Entretanto, como cada mistura asfáltica apresenta características específicas referentes ao local para o qual foi projetada, o fresado pode ser considerado um problema quando a origem é desconhecida, visto que se desconhece as propriedades do material de origem, ou quando ocorre armazenagem conjunta de materiais de fontes diferentes, pois suas composições

granulométricas e de ligante podem ser completamente distintas o que pode afetar no seu comportamento quando forem reutilizadas (DNIT, 2006).

Quando esses materiais são enviados para aterros, frequentemente a destinação não ocorre da forma recomendada. Devido a presença do ligante betuminoso combinado com possíveis aditivos químicos usados na composição da mistura asfáltica, no caso do fresado, e dos ligantes químicos e metais pesados presentes na areia descartada de fundição, esses materiais se tornam passivos ambientais com tendências a lixiviar e potencialmente liberar compostos químicos no solo que podem ser carregados para lençóis freáticos e por sua vez culminar na contaminação destes. Por outro lado, estes materiais podem ser inertes.

Portanto, para afirmar com certeza sobre seu potencial de contaminação é necessário que o fresado e a areia descartada de fundição sejam submetidos aos ensaios de lixiviação e solubilidade segundo normativas, analisados e seus resultados comparados com os limites estabelecidos. Isto posto, este trabalho visa, por meio de análises laboratoriais e revisão de literatura técnica avaliar o comportamento de ambos os materiais por meio de ensaios normatizados de solubilidade e lixiviação considerando o efeito da variação do pH.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho foi avaliar a influência do pH na lixiviação e solubilização de compostos mediante a avaliação de parâmetros físico-químicos da água em contato com areia descartada de fundição e fresado de asfalto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a areia descartada de fundição e o fresado de asfalto por meio de ensaios normatizados;
- Determinar o potencial de contaminação dos materiais pela análise da cor, turbidez e do teor de sulfato, da água resultante dos ensaios de lixiviação e solubilidade, comparando com a normativa vigente;
- Analisar a influência do pH na liberação de sulfato, cor e turbidez;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

A fundição consiste na obtenção de peças moldadas, artigo e peças em bruto (antes de serem banhadas por metais preciosos), através da fusão e do derramamento do metal fundido em moldes. Sua principal vantagem reside na possibilidade de produzir facilmente peças complexas. Os moldes utilizados podem ser metálicos (fundição a pressão, lingoteiras e centrífuga), semitemporais de massas refratárias ou moldes temporários (areias), sendo que esse último se desmorona ao sair a peça. O processo de fundição divide-se usualmente em: preparo do molde, derrame do metal fundido no molde, extração do molde pós solidificação do metal e limpeza (MALISHEV *et al.*, 1970).

De acordo com Luz e Lins (2005), a areia industrial, também chamada de areia quartzosa ou areia de sílica (*silica sand*) é um material que apresenta granulometria entre 0,5 e 0,1 mm e possui alto teor de sílica (SiO_2) na forma de quartzo. Apresentam impurezas como óxidos de ferro, metais pesados e argila. São consideradas matérias primas minerais de origem secundária, pois provém da sedimentação de arenitos e quartzitos que sofreram concentrações através de ciclos de deposição e erosão no decorrer do tempo. Normalmente estão associadas a depósitos litorâneos ou coberturas sedimentares.

Para a indústria, a areia é valorizada principalmente por suas características físicas e químicas, sendo que dependendo de sua aplicação ela passa por diversos processos mais ou menos complexos. No Brasil, cerca de 60 a 65% da areia industrial é destinada à fabricação de vidro, 30% destinada à fundição e 5% ao consumo (LUZ e LINS, 2005)

No processo de fundição de metais existem diversos métodos de moldagem, que dependem do tipo de metal com o qual está sendo trabalhado, sendo o uso de areia (verde, sintética ou natural aglomerada com argila úmida ou com ligante químico) o mais comum. Esse material apresenta alta coesão e plasticidade devido a presença de elementos aglomerantes e aditivos que aumentam seu desempenho. A areia usada é de boa qualidade, granulometria uniforme, grãos com alta esfericidade e suas características químicas e físicas dependem do tipo de processo de fundição e do setor que a empresa que está empregando a areia atua (SIDDIQUE *et al.*, 2010; LUZ e LINS, 2005; FAGUNDES; DA SILVA, 2011).

A “areia verde” recebe esse nome não por sua coloração, mas sim pela forma como é empregada – úmida – que remete a madeira verde. É composta por 85-95% de areia de sílica de alta qualidade: resistente a altas temperaturas; 4-10% de argila bentonita como ligante: mantem os grãos de areia juntos na fôrma; 2-10% de aditivo de carbono: confere a cor escura para areia e tem como função a finalização da superfície e evitar que a areia se funda com o metal; e 2-5% de água: confere plasticidade à mistura e ativa a função de ligante da argila. Contém também traços de óxido de magnésio (MgO), dióxido de potássio (K₂O) e dióxido de titânio (TiO₂) e outros ingredientes “menores” que absorvem umidade e aumentam a fluidez da areia (SIDDIQUE *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2011).

A areia com ligante químico geralmente emprega um ou mais ligantes orgânicos, os quais podem ser metassilicato de sódio, resinas fenólicas, resinas ureia-formaldeído, resinas furânicas ou poliuretânicas, em conjunto com catalisadores e diferentes processos de endurecimento. É composta por 93 a 99% de sílica e 1-3% de ligante químico, o qual tem por principal função permitir a moldagem da areia e a fixação por cura do molde, geralmente apresenta cor mais clara e textura mais leve se comparada com a areia verde (SIDDIQUE *et al.*, 2010; QUISSINI, 2009; VILAR, 2004).

Conforme Malishev *et al.* (1970), Ferreira (1999) e Ammen (2000), os moldes de areia aglomerados com argila e alguns aditivos são chamados de mistura de moldagem, e para que o produto final tenha alta qualidade é necessário que os elementos que o compõem sejam baratos e apresentem propriedades que são de grande importância para seu desempenho, as quais são determinadas através de ensaios laboratoriais, e são apresentadas no Quadro 1.

(continua)

<i>Propriedade</i>	<i>Descrição</i>
<i>Plasticidade</i>	Capacidade de reproduzir as formas de moldagem e conservá-las, e se eleva proporcionalmente à quantidade de água e material argiloso.
<i>Coesão</i>	Depende do tamanho e forma dos grãos, que influenciam diretamente nas propriedades dos moldes. Quanto mais irregulares e com arestas os grãos, melhor o intertravamento da estrutura quando moldada, por consequência usa-se menos argila e os moldes serão mais porosos do que se os grãos fossem mais arredondados.
<i>Resistência mecânica</i>	Resistência à choques ao armar, transportar e encher o molde, cresce com o aumento de argila e de substâncias aglutinantes, mas depende também do tamanho e forma dos grãos da areia. A areia por si só não apresenta boa resistência por não ser uma estrutura aglomerada, e, portanto, temos que para uma mesma quantidade de aglomerante, areias com grãos grossos apresentam maior resistência do que areias de grãos finos devido a área específica menor. Com areias de distribuição granulométrica uniforme se obtém melhores resistências devido ao aumento de pontos de contato agregado-aglomerante. Resistência a tração – é a força que mantém o molde no lugar e onde ocorrem as principais falhas, visto que a resistência a compressão é maior.
<i>Finura</i>	É a medida do tamanho dos grãos e é feita passando a amostra por uma série de peneiras normatizadas. O ideal é que a areia usada para os moldes apresente considerável porcentagem de seus grãos de um mesmo tamanho. Quanto mais finos os grãos, melhor o acabamento superficial, entretanto reduz a superfície específica.

Quadro 1 - Propriedades das misturas moldagem

(conclusão)

<i>Propriedade</i>	<i>Descrição</i>
<i>Permeabilidade gasosa</i>	Capacidade de deixar sair os gases e depende de sua porosidade. É essencial para facilitar a saída do ar e dos vapores de água enquanto a cavidade é cheia pelo metal fundido, e especialmente dos gases liberados pelo metal enquanto este se solidifica. Quando a permeabilidade é insuficiente ocorre a retenção destes gases e a formação de “sopros” na peça, áreas onde há falta de metal vazado. A granulometria da areia influencia diretamente na permeabilidade, grãos grossos apresentam maior permeabilidade, mas reduzem a qualidade do acabamento superficial, já os grãos finos têm efeito contrário, por esse motivo busca-se uma granulometria uniforme, que reduz a permeabilidade total, sem prejudicar o acabamento das peças.
<i>Capacidade refratária</i>	É a capacidade de resistir a altas temperaturas provenientes do metal, ou seja, sem que o molde amoleça, se afunde ou adira à peça quando em contato com essa. A sílica pura funde em temperaturas próximas a 1710°C, entretanto, quando apresenta impurezas químicas de composições de fácil fusão, como CaCO ₃ , MgCO ₃ e Na ₂ CO ₃ , as quais reagem com o SiO ₂ e reduzem essa propriedade, a temperatura pode reduzir para 1350°C. Tendo que a temperatura de vazamento necessária varia de acordo com o tipo de metal usado; é necessário que os moldes que forem empregados para qualquer tipo de metal suportem temperatura superiores a 1500°C (temperatura aproximada de vazamento do aço).
<i>Condutibilidade térmica</i>	Depende do grau de umidade do molde e geralmente é reduzida pelo processo de secagem ou pela adição de carvão mineral moído. Essa propriedade influencia na velocidade de resfriamento do metal e por consequência na sua estrutura.
<i>Formabilidade ou moldabilidade</i>	Consiste na propensão do molde se contrair tanto quanto o metal e como resultado reduzir de volume. Esse processo pode resultar no aparecimento de fendas caso o molde não seja formável. A presença de argila reduz essa propriedade, enquanto que areias grossas apresentam boa formabilidade.
<i>Capacidade de longo serviço ou durabilidade</i>	Capacidade de ser empregado repetidas vezes para à produção de moldes é diretamente afetada pelo tipo e quantidade de argila usada (sua capacidade de reter umidade) e pela finura da areia.

Quadro 1 - Propriedades das misturas moldagem

Fonte: elaborado pela Autora com base em Malishev *et al.* (1970); Ferreira, (1999) e Ammen, (2000).

Após alguns usos, a areia perde propriedades e se torna inutilizável para a fabricação de novos moldes necessitando ser descartada, e esse descarte geralmente é realizado em aterros industriais (CASALI *et al.*, 2018).

A NBR 15.702 (ABNT, 2009), estabelece as diretrizes de uso da Areia Descartada de Fundação para pavimentação e aterros sanitários. Muitos trabalhos têm surgido com a intenção de propor soluções para reutilizá-la e com isso solucionar essa questão de alocação. O reuso da ADF não somente favorece o meio ambiente, retirando um passivo ambiental dele, mas também o beneficia quando se reduz a retirada de areias de jazidas ao se reutilizar o resíduo na pavimentação (SOLOMAZ *et al.*, 2008; KLINSKY *et al.*, 2012; DYER *et al.*, 2018; VAN DER

VEM *et al.*, 2011; NETO e FABBRI, 2004), na construção civil, na fabricação de concreto e argamassas (AGGARWAL e SIDDIQUE, 2014; SINGH e SIDDIQUE, 2012; KRÜGER *et al.*, 2013; ETXEBERRIA *et al.*, 2010; GUNEY *et al.*, 2010; SIDDIQUE e SINGH, 2011), como subleito de aterros e base de assentamento de canos (ARULRAJAH *et al.*, 2017) e como cobertura de aterros sanitários (QUISSINI, 2009). Outro ponto positivo é a redução de custos de transporte e de disposição do resíduo para as indústrias de fundição, visto que aterros industriais não são tão comuns.

3.2 FRESADO DE ASFALTO

Devido à escassez de materiais asfálticos ocorrida em 1970 agregada a crise econômica internacional, surgiu a ideia de reprocessar e reciclar materiais de pavimentação de pistas deterioradas, possibilitando melhorias nas condições de trafegabilidade de vias de forma satisfatória financeira e tecnicamente. Inicialmente o processo utilizado para remoção do revestimento asfáltico era a escarificação, a qual removia toda a camada betuminosa (BONFIM, 2001).

Na segunda metade dos anos 70, o equipamento de fresagem foi concebido simultaneamente na Europa e na América do Norte, o qual garantia o desbaste da camada betuminosa em diversas profundidades pré-determinadas. No Brasil, a técnica de fresagem teve início nos anos de 1980 e é constantemente aplicada como parte de um processo de recuperação de pavimentos deteriorados, podendo solucionar problemas urbanos como evitar a alteração de calçadas e da drenagem pluvial (BONFIM, 2001).

A fresagem ou perfilagem é utilizada para proporcionar nova superfície de rolamento, fazer rebaixamento do greide, regularização geométrica e melhora da aderência com novas camadas, realização de remendos sem desnível nas emendas, correção ou alteração da inclinação das pistas, para correção de defeitos superficiais (SENÇO, 2006; BONFIM, 2001).

De acordo com Bonfim (2001), a fresagem pode ser realizada de duas formas: a frio ou a quente. A frio, o processo é realizado em temperatura ambiente, o único aquecimento que o pavimento é submetido, que pode ser considerado desprezível, é da energia liberada pelo impacto dos dentes de corte do equipamento. Nessa forma, ocorre a quebra de parte dos agregados na profundidade de corte e altera a curva granulométrica do material existente. O processo a quente é utilizado para reciclagem “*in situ*”, e realiza-se o pré-aquecimento do revestimento, entretanto nessa forma de fresagem ocorre o desbaste da camada, a qual oferece pouca resistência ao corte. Nesse processo não ocorre alteração significativa da granulometria do material, apenas desagregação do mesmo.

O material resultante do processo é chamado de fresado, e por suas propriedades nobres pode ser reutilizado como agregado na pavimentação através da reciclagem. Uma das principais dificuldades encontradas é a granulometria resultante dos processos realizados à frio devido ao aparecimento de grumos (BONFIM, 2001). Quando a reciclagem não é feita “*in situ*”, o material deve ser estocado para futuro reaproveitamento com possível padronização da granulometria. Entretanto, quando estocado, geralmente em locais a céu aberto, o material tende a reagir com os agentes químicos presentes no meio e através do processo de lixiviação pode liberar contaminantes no solo e em lençóis freáticos próximos.

3.3 LIXIVIAÇÃO DOS MATERIAIS

De acordo com Siddique *et al.* (2010), quando em aterros os materiais podem passar pelo processo de lixiviação, sendo que o resultado desse processo é o lixiviado, um líquido com material suspenso e dissolvido que se caracteriza por ter água como base e ter quatro grupo de contaminantes: matéria orgânica dissolvida (álcoois, ácidos, aldeídos, açúcares de cadeia curta, etc.), macro componentes inorgânicos (cátions e ânions comuns, como sulfatos, cloretos, ferro, alumínio, zinco e amônia), metais pesados (Pb, Ni, Cu e Hg) e compostos orgânicos xenobióticos, como orgânicos halogenados. Os riscos provenientes desse processo podem ser minimizados pela elaboração e desenvolvimento de aterros com materiais geológicos, geotêxteis ou argilas impermeáveis.

Existem diversos métodos para se realizar o ensaio de lixiviação em laboratório, entretanto, no Brasil existe apenas uma norma técnica que estabelece procedimentos para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos, a NBR 10.005 (ABNT, 2004), na qual o material triturado é submetido a uma solução ácida de pH 5,0 por 18h. A metodologia descrita na Legislação Italiana (ITÁLIA, 1998), permite a análise do material sem ser triturado, com o uso de água deionizada e prevê a análise temporal da lixiviação, com coletas em 8 intervalos de tempo (MIKAMI, 2017).

As diferentes condições de ensaio e por consequência os resultados obtidos por cada um deles podem ter variações não desprezíveis, portanto, ao adotar uma norma deve-se atentar para o tipo de material e a utilização deste. Outro ponto a ser levado em consideração é as condições reais sob as quais o material estará sujeito, visto que os ensaios de laboratório diferem de maneira significativa das condições de campo (MIKAMI, 2017).

3.3.1 Areia Descartada de Fundação (ADF)

O lixiviado resultante da ADF pode conter compostos orgânicos e poliaromáticos (30% naftaleno), incluindo fenóis, formaldeídos, metais e óleos minerais. Em geral, nas análises presentes na literatura os níveis de metal encontrados no lixiviado da ADF foram abaixo dos

limites de detecção, exceto quando usado o método TCLP (*toxicity characteristic leaching procedure* – procedimento de caracterização da toxicidade do lixiviado), onde o lixiviado apresentou altas concentrações de cobre (122 mg L^{-1}), chumbo (48 mg L^{-1}) e zinco (141 mg L^{-1}), todos acima do limite regulatório (máx. 5 mg L^{-1}) (SIDDIQUE *et al.*, 2010).

Segundo Penkaitis e Sígolo (2012), a disposição em aterros de materiais utilizados na indústria, como a ADF podem causar contaminação direta do solo e possivelmente contaminar os lençóis freáticos devido a presença de metais agregados a sua composição no processo de fundição. Através dos estudos realizados pelos autores com uma ADF em um aterro no estado de São Paulo, nenhum elemento tóxico foi encontrado na areia acima dos limites estipulados. Ao analisar a concentração desses elementos no lençol freático próximo ao aterro, os resultados foram inferiores aos limites de detecção. Os elementos analisados foram alumínio (ND), bário ($0,17 \text{ mg L}^{-1}$), boro ($0,32 \text{ mg L}^{-1}$), cádmio (ND – Não Detectável), chumbo (ND), cloreto (8 mg L^{-1}), ferro total ($0,32 \text{ mg L}^{-1}$), fluoreto (ND), manganês ($0,52 \text{ mg L}^{-1}$), nitrato (como NO_3 – $11,2 \text{ mg L}^{-1}$), selênio ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$), sódio ($88,7 \text{ mg L}^{-1}$) e sulfato ($26,00 \text{ mg L}^{-1}$) e as comparações foram feitas com a Portaria nº 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde. As concentrações acima dos limites regulatórios encontradas na água analisada do lençol freático após o aterro foram ferro (máx. $0,30 \text{ mg L}^{-1}$), manganês ($0,10 \text{ mg L}^{-1}$) e selênio ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$), indicando que a disposição da areia descartada de fundição causou impacto ambiental na área estudada. A concentração de cromo ($0,068 \text{ mg L}^{-1}$) encontrada na análise mineralógica não foi considerada perigosa, pois foi abaixo do limite estabelecido pela NBR 10.004:2004 (5 mg L^{-1}), entretanto não se analisou se o material era ou não inerte.

Por mais que o resíduo não tenha sido considerado perigoso, é importante ressaltar que a mera presença desses elementos tóxicos, mesmo que em baixas concentrações, em lençóis freáticos pode comprometer não somente a área do aterro em si, como pode levar a contaminação a longo prazo de águas usadas para consumo em locais próximos ao local de depósito do resíduo. Outro ponto destacado pelos autores, é que a atual metodologia de classificação dos resíduos considera o potencial poluidor dos resíduos com base em ensaios conduzidos em laboratórios e, portanto, condições controladas e simuladas. Entretanto, quando o resíduo está em um aterro e é exposto a alterações climáticas e físico-químicas, seus constituintes tendem a reagir com os elementos presentes na área em que ele for disposto, e é onde se encontra o risco. Poucos estudos investigam os impactos ambientais desse tipo de resíduo a longo prazo, visto que no passado não havia preocupação com sua correta disposição considerando os riscos de liberação de contaminantes (PENKAITIS e SÍGOLO, 2012).

3.3.2 Fresado de Asfalto (FA)

Pesquisas desenvolvidas por Brantley e Townsend (1999), Legret *et al.* (2005) e Norin e Strömvaix (2004) concluíram, analisando experimentalmente os metais pesados, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e a composição química do resíduo, que o lixiviado proveniente do fresado de asfalto apresentou toxicidade abaixo do limite normativo, não apresentando risco de contaminação ambiental. Os ensaios de Legret *et al.* (2005) apresentaram maiores valores para esses mesmos parâmetros nos estágios iniciais, mas os valores reduziram rapidamente chegando a serem inferiores aos limites de detecção. Nos ensaios conduzidos por Brantley e Townsend (1999), para o fresado de estradas antigas de Jacksonville ($26,5 \mu\text{g L}^{-1}$) e Indian Town ($33,4 \mu\text{g L}^{-1}$), as concentrações de chumbo foram acima do especificado para água potável ($15 \mu\text{g L}^{-1}$). Já o ensaio desenvolvido por Norin e Strömvaix (2004) os resultados obtidos em laboratório para concentrações de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e elementos de alto peso molecular apresentaram valores maiores após dois anos no ensaio de coluna do que no início do armazenamento. Em contrapartida a concentração de compostos semi voláteis (como naftaleno, BHT, DEHP, entre outros) na maior parte dos casos foi inferior do que os valores obtidos nas pilhas de estocagem, necessitando aprofundar os estudos com medidas reais de campo.

Por mais que o material não seja completamente contaminante é necessário que estudos nessa área continuem a ser realizados para que se estabeleçam métodos de minimizar a possível contaminação que pode ocorrer a longo prazo, caso esses resíduos não sejam reutilizados e permaneçam em aterros sanitários.

3.4 SOLUBILIDADE

A solubilidade pode ser definida como a máxima quantidade de uma substância que pode ser dissolvida totalmente usando uma certa quantidade de solvente. É um termo quantitativo, uma propriedade física que desempenha um papel de grande importância em diversas áreas de pesquisa, como em ciências biológicas, química, física, entre outros, especialmente na área ambiental, pois permite entender o comportamento de poluentes e contaminantes, bem como os processos de adsorção no solo e de bioconcentração de agrotóxicos, por exemplo (GONG *et al.*, 2007; MARTINS *et al.*, 2013).

Em geral, a solubilidade está relacionada com a estrutura e o tamanho molecular, a polaridade das ligações, as forças dispersivas e dipolares, as ligações de hidrogênio e a temperatura. Usualmente, compostos polares são solúveis em solventes polares e em contrapartida os compostos apolares são solúveis em solventes apolares ou de baixa polaridade, o que indica que a solubilidade de compostos está diretamente relacionada com as forças de atração intermoleculares de Van de Waals (MARTINS *et al.*, 2013).

Quando se trata da solubilidade de compostos orgânicos, pode-se dividi-la em duas: solubilidade intermolecular, onde somente as forças de mesmo nome estão envolvidas e solubilidade com reação química, como a reação ácido-base. Ao se analisar semiquantitativamente a solubilidade de certa substância em alguns solventes (como água, éter etílico, ácido clorídrico diluído, solução de bicarbonato de sódio, entre outras) é possível obter informações sobre a presença ou ausência de alguns grupos funcionais ou classe de compostos orgânicos. Para isso é necessário se atentar para a temperatura, a qual interfere significativamente na propriedade e para valores acima do qual a substância a ser analisada é considerada solúvel e abaixo do qual é considerada insolúvel (MARTINS *et al.*, 2013).

Os ensaios de solubilidade são úteis na verificação da polaridade de substâncias orgânicas, identificação da classe funcional e na determinação de solventes em recristalizações, análises cromatográficas, análises espectrais e em reações químicas (MARTINS *et al.*, 2013).

3.5 PARÂMETROS FÍSICOS

3.5.1 Quadro resumo dos parâmetros estabelecidos pelo DNER-ME

<i>Parâmetro</i>	<i>Referência Normativa</i>	<i>Definição</i>
<i>Granulometria</i>	DNER-ME 083/1998	A distribuição granulométrica ideal dos agregados depende do uso para o qual este é destinado, e corresponde a composição do agregado com base no tamanho dos grãos e suas porcentagens com relação a massa total. Essa análise permite identificar o tamanho de grãos predominante na amostra, bem como sua aplicabilidade para a construção civil e pavimentação.
<i>Dimensão Máxima Característica do Agregado</i>		É definida como uma grandeza associada a distribuição granulométrica do agregado e corresponde a abertura nominal (em milímetros) da malha da peneira normal ou intermediária na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente superior a 5% em massa.
<i>Módulo de Finura</i>		Corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100.
<i>Densidade Real</i>	DNER-ME 084/1995	Consiste na relação da massa de certo volume de amostra para massa de mesmo volume de água destilada, ambas a 25°C.
<i>Teor de Umidade</i>	DNER-ME 192/1997	Consiste na quantidade de água presente na amostra, o qual influencia na trabalhabilidade do material final e em como este irá se comportar quando aplicado a sua função.

Quadro 2 - Parâmetros físicos analisados e suas finalidades

Fonte: elaborado pela Autora com base em DNER, 1995; DNER, 1997 e DNER, 1998.

3.5.2 Difração e Fluorescência de Raios-X

Os raios-X consistem numa forma de radiação eletromagnética de ondas curtas, descoberta em 1895 por Wihelm Röntgen. As técnicas desenvolvidas baseadas no raio-X proporcionaram ferramentas importante para físicos teóricos no início do século XX. As técnicas analíticas baseadas na difração e na espectrometria de raios-X, ambas concebidas a quase um século, tornaram-se indispensáveis para o estudo de sólidos orgânicos e inorgânicos, especialmente por se constituírem de técnicas não destrutivas (JENKINS, 1999).

A difração de raios-X é utilizada para o estudo da estrutura de materiais sólidos, uma vez que estes são formados de cristais, os quais consistem em átomos ou molécula organizadas em padrões que se repetem regularmente em três dimensões. Portanto, quando submetidos a raios-X, ocorrem três fenômenos básicos: fluorescência, absorção e dispersão. Os fótons dispersos podem sofrer interferências que resultam na difração máxima, a qual pode ser relacionada com os planos dos átomos na estrutura cristalina, facilitando o estudo das estruturas destes materiais (JENKINS, 1999).

A espectrometria de fluorescência de raios-X permite a identificação dos elementos que compõem determinada amostra através da medida do comprimento de onda ou da energia emitida por esta quando submetida a raios-X. Permite a quantificação de certo elemento relacionando a intensidade da emissão com a intensidade da concentração. (JENKINS, 1999).

A espectrometria é uma técnica que, por se tratar de emissão, permite análises quantitativas e qualitativas e multielementos simultaneamente e apresenta uma cobertura de elementos significativa, apesar de ser inerentemente insensível a elementos leves. Em geral apresenta boa sensibilidade, baixa interferência espectral, amplo alcance dinâmico e habilidade de analisar tanto sólidos quanto líquidos. Uma de suas aplicações é a análise de sólidos e inorgânicos, aplicada especialmente para busca de elementos tóxicos, determinando a concentração de metais e não metais (TAYLOR *et al.*, 1994).

3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

De acordo com Kestenbach e Botta Filho (1994), o microscópio eletrônico de varredura (MEV) tem sua aplicação geralmente para observação de amostras não transparentes a elétrons, e a razão principal de sua utilização está associada à alta resolução atingida (da ordem de 3 nm) e a grande profundidade de foco (cerca de 300 vezes melhor que o microscópio ótico), culminando em imagens com aparência tridimensional.

As imagens do MEV são constituídas ponto a ponto, sendo que o processo consiste na focalização de um feixe de elétrons de alta energia em um ponto da amostra, o que causa a emissão de elétrons com considerável espalhamento de energia, a qual é coletada e amplificada

para fornecer um sinal elétrico. Este é utilizado para modular a intensidade de um feixe de elétrons no tubo de raios catódicos (TRC). A construção da imagem ocorre pela varrição de um feixe de elétrons na superfície da amostra enquanto o feixe do TRC é varrido sobre um rastro geometricamente similar (KESTENBACH e BOTTA FILHO, 1994).

Essa técnica é utilizada especialmente para estudar e determinar características da superfície ou de regiões próximas a ela de materiais usualmente granulares. Ela parte do princípio de que cada sinal é resultado de alguma interação entre o elétron incidente e a amostra em questão e, portanto, pode fornecer diferentes informações sobre a amostra, como por exemplo a composição desta e as características de sua superfície (GOODHEW *et al.*, 2001).

3.6 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

3.6.1 pH

O pH é o potencial Hidrogeniônico e representa a concentração de íons de hidrogênio H^+ em escala antilogarítmica. O resultado fornece indicações de acidez (valores menores que 7), neutralidade (valores iguais ou próximos a 7) ou alcalinidade (valores superiores a 7) da amostra a ser avaliada e varia de 0 a 14. Sua origem natural se dá devido a dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, fotossíntese de algas ou plantas aquáticas e oxidação da matéria orgânica presente na água. Já sua origem antropogênica se dá através da oxidação da matéria orgânica presente em despejos domésticos ou através de despejos industriais que contenham compostos com pH alterado (VON SPERLING, 2017).

De acordo com Von Sperling (2017), em termos de saúde pública, o pH só é preocupante quando próximo aos extremos, podendo chegar ao ponto de causar irritações de pele ou nos olhos. Quando distante da neutralidade pode afetar a vida aquática e os processos de tratamento, distribuição de água e coleta de esgoto. A água natural tende a apresentar pH entre 4 e 9 devido a presença de bicarbonatos e carbonatos dos metais alcalinos e dos metais alcalinos-terrosos (APHA, 1998).

Quando se trata da solubilidade de metais tóxicos, o pH é um dos fatores que exerce maior influência, especialmente o do solo, que de forma geral quando se encontra neutro ou levemente alcalino favorece a adsorção do metal no solo, visto que este está sujeito a precipitação e formação de hidróxidos, carbonatos e fosfatos, os quais por sua vez são ligações de difícil solubilização o que reduz sua lixiviação para águas subterrâneas. Em contrapartida, a presença de íons H^+ em altas concentrações, em águas de lixiviação, contribuem para a solubilidade de metais pesados, o que pode comprometer a qualidade dos recursos hídricos (AGOURAKIS *et al.*, 2006; GAIVIZZO *et al.*, 2002; CAMPOS, 2010).

3.6.2 Cor

A cor é responsável pela coloração na água e pode ser a cor verdadeira, que é dada apenas pelos sólidos dissolvidos quando a turbidez é removida, ou a cor aparente, a qual é composta pelas substâncias em solução e em suspensão. Esta é determinada com a amostra sem passar por processos de filtração ou centrifugação. Para alguns resíduos industriais, a cor é determinada principalmente por materiais em suspensão, portanto é importante a determinação de ambas (APHA, 1998; VON SPERLING, 2017).

A origem natural da cor vem da decomposição de matéria orgânica ou da presença de óxidos de ferro e manganês, não representando risco direto a saúde, mas causando desconfiância na confiabilidade da água por parte de quem está consumindo. Já a origem antropogênica da cor vem, frequentemente, de resíduos industriais e de esgoto doméstico, os quais podem ou não apresentar toxicidade (VON SPERLING, 2017; PIVELI e KATO, 2006).

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde o valor máximo permitido de cor aparente para água potável é de 15 uH (BRASIL, 2018).

3.6.3 Turbidez

A turbidez pode ser definida por APHA (1998), como a “expressão da propriedade ótica que faz com que a luz seja dispersa e absorvida ao invés de transmitida sem mudança de direção ou fluxo através da amostra”, ou seja, representa o quanto as partículas em suspensão interferem na passagem de luz pela amostra, geralmente água (VON SPERLING, 2017).

A principal causa da turbidez se dá pelos sólidos suspensos e pela matéria coloidal, que quando de origem natural, podem ser partículas minerais como silte, argila ou rocha e matéria orgânica ou inorgânica fina, plâncton e outros organismos microscópicos. A água turva é esteticamente desagradável, e diretamente não apresenta inconvenientes, entretanto os sólidos suspensos podem abrigar organismos patogênicos. Os sólidos quando de origem antropogênica, podem vir de despejos domésticos ou industriais, microrganismos e erosão ou podem estar associados a organismos patogênicos ou tóxicos e em corpos d'água pode interferir na entrada de luz para a fotossíntese (VON SPERLING, 2017).

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde o valor máximo permitido de turbidez para água potável é de 5 uT (BRASIL, 2018).

3.6.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica consiste na medida da habilidade de certa solução aquosa conduzir uma corrente elétrica, a qual depende não somente da presença de íons, mas também de sua concentração, mobilidade, valência e da temperatura em que é realizada a medição. Soluções com compostos inorgânicos tendem a ser boas condutoras, em contrapartida

moléculas orgânicas não se desassociam em soluções aquosas e por isso apresentam baixa ou nenhuma condutividade (APHA, 1998).

3.6.5 Alcalinidade

A alcalinidade é definida como a quantidade de íons necessários para reagir na neutralização dos íons de hidrogênio e consiste na soma de todas as bases tituláveis. É uma propriedade agregada da água e pode ser interpretada de forma bem específica quando a composição química da amostra é conhecida. Seus principais constituintes são os bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-), cuja distribuição depende diretamente do pH (APHA, 1998; VON SPERLING, 2017).

A origem natural da alcalinidade depende da dissolução de rochas e/ou da reação do CO_2 , advindo da atmosfera ou da decomposição da matéria orgânica, com a água. Sua origem antropogênica frequentemente é de despejos industriais. A alcalinidade não apresenta problemas sanitários, entretanto quando em altas concentrações concede um sabor amargo para a água (VON SPERLING, 2017).

3.6.6 Acidez

A acidez consiste na quantificação da capacidade da água de reagir a mudanças de pH causadas por bases fortes. É uma propriedade agregada que pode ser interpretada de forma específica quando a composição química da amostra for conhecida. Esta propriedade ocorre principalmente pela presença de gás carbônico livre, mas pode ser causada por minerais ácidos, ácido acético e carbônico, e pela hidrólise de sais como sulfatos de ferro ou alumínio (APHA, 1998; VON SPERLING, 2017).

A acidez origina-se naturalmente pela absorção de CO_2 da atmosfera ou resultante da decomposição de matéria orgânica e pelo gás sulfídrico e de forma antropogênica pelos despejos industriais, através de ácidos minerais ou orgânicos e pela passagem de água por minas abandonadas ou borras de minério. Ela tem baixo prejuízo sanitário, entretanto quando a água apresenta alto nível de acidez mineral ela tende a ser rejeitada por ser desagradável ao paladar. A acidez contribui para o aumento da corrosividade e tem influência nas taxas de reações químicas e nos processos biológicos, sendo que o valor também reflete a qualidade da fonte (APHA, 1998; VON SPERLING, 2017).

3.6.7 Sulfato

O sulfato é um composto comum na natureza e pode ser encontrado na água em diversas proporções. Sua origem se dá através da oxidação de piritas e dos resíduos de drenagem de minas e por meio da descarga de efluentes doméstico e industrial em águas superficiais. Já

nas águas subterrâneas o sulfato surge pela dissolução de solos e rochas como gesso, sulfeto de magnésio e sulfeto de ferro (APHA, 1998; PIVELI e KATO, 2006).

Em águas de abastecimento é importante controlar o sulfato, pois ele pode causar efeito laxativo. Em águas de abastecimento industrial provoca incrustações em caldeiras e pode gerar também a corrosão em coletores de esgoto de concreto, além do mau odor aliado ao efeito tóxico do gás sulfídrico gerado (PIVELI e KATO, 2006).

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde o valor máximo permitido de sulfato para água potável é de 250 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2018).

3.6.8 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO é definida por APHA (1998) como a quantidade de certo oxidante que reage com a amostra sob condições controladas. A quantidade de oxidante é expressa em termos de equivalência de oxigênio. Nesse método, tanto os compostos orgânicos quanto os inorgânicos estão sujeitos a oxidação, mas o que mais interessa e se destaca são os orgânicos.

Normalmente essa análise é usada para medir os poluentes nas águas naturais e residuais e seu valor pode ser relacionando com a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (APHA, 1998).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Saneamento e Instalações Hidráulicas, Laboratório de Pavimentação, Laboratório de Recursos Hídricos e no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LabMu), na Universidade Estadual de Ponta Grossa – Campus Uvaranas.

Na Figura 1 estão representadas as principais etapas desse estudo, desde a caracterização dos materiais, a análise do extrato lixiviado e solubilizado.

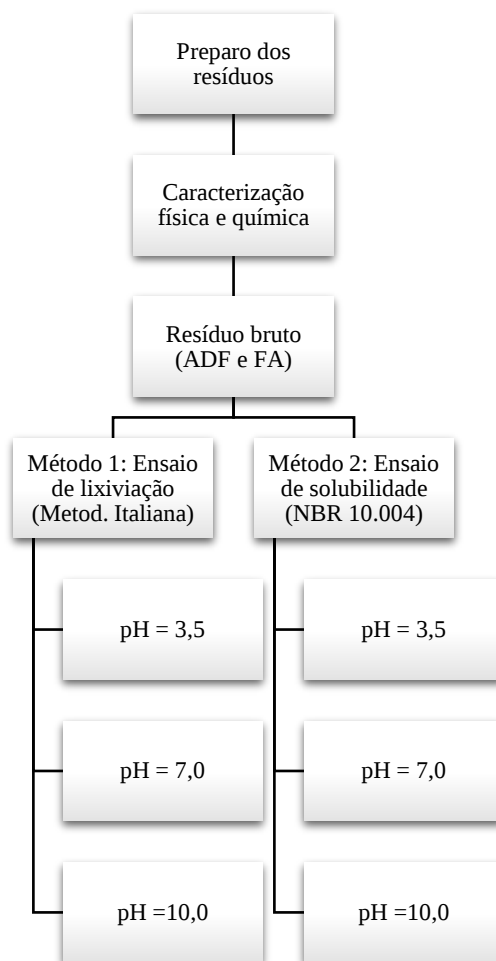


Figura 1 - Fluxograma com as etapas realizadas nesse trabalho

Fonte: A autora.

4.1 PREPARO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS

Os resíduos utilizados nessa pesquisa eram provenientes de uma empresa de consultoria e serviços ambientais do município de Ponta Grossa e estão apresentados nas Figuras 2 e 3 abaixo.



Figura 2 - Areia Descartada de Fundição (ADF)

Fonte: A autora.



Figura 3 - Fresado de Asfalto (FA)

Fonte: A autora.

Ambos os materiais foram passados por um repartidor de amostras (Figura 4) para que se obtivesse uma amostra significativa para o estudo, visto que eles estavam parados dentro dos recipientes a algum tempo, e depois foram levados à estufa ($100^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ para ADF e $60^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ para FA) para remover a umidade de parte das amostras. As temperaturas adotadas foram diferentes para as amostras, pois o fresado contém asfalto, o qual passa para o estado líquido a temperaturas próximas a 80°C . Portanto, se fosse levado à mesma temperatura que a areia o asfalto se desprenderia do agregado, comprometendo as análises posteriores do material.



Figura 4 - Repartidor de amostras

Fonte: A autora.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Após a obtenção da amostra significativa e da secagem da mesma, realizou-se a análise das propriedades físicas dos materiais conforme as metodologias descritas no Quadro 3.

<i>Parâmetro</i>	<i>Repetições</i>	<i>Métodos</i>
<i>Granulometria</i>	2	EM-083 (DNER, 1998)
<i>Densidade Real</i>	2	ME-084 (DNER, 1995)
<i>Teor de Umidade</i>	2	ME-192 (DNER, 1997)

Quadro 3 - Parâmetros físicos analisados e respectivos métodos de ensaio

Fonte: A autora.

O preparo de cada amostra foi realizado de acordo com as metodologias propostas. Além da caracterização física, realizou-se a caracterização da composição química das amostras pela análise de fluorescência de raios-X, realizada num espectrômetro da marca Rigaku, modelo Primus II do C-LabMu e através da difração de raios-X, realizada em um difratômetro da marca Rigaku, modelo Ultima IV do C-LabMu. Outra análise realizada para caracterização física foi a microscopia eletrônica de varredura (FEG) realizada em um microscópio eletrônico da marca Tescan, modelo Mira 3 do C-LabMu. Para todas as análises realizadas no C-LabMu foi utilizada a amostra passante na peneira de abertura 0,075 mm para ambos os materiais.

4.3 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO (MÉTODO 1)

Para a caracterização físico-química, optou-se por submeter os materiais estudados ao ensaio de lixiviação (método 1) adaptado de acordo com os estudos desenvolvidos por Mikami (2017). O material foi submerso em água de abastecimento adotando proporção em volume de água:agregado constante, igual a 1:5, determinada em ensaios prévios realizados em laboratório, sendo utilizado 548,6 g de amostra de ADF para 1,1 L de água e 559,36 g de Fresado para 1,1 L de água; variação de pH entre as amostras (3,5, 7,0 e 10,0), realizando-se também as análises para amostras apenas de água de abastecimento, como parâmetro de

controle, a coleta de amostras foi realizada 24 horas após a incubação do material., o qual foi mantido em temperatura ambiente.

Para cada tratamento foram realizadas 4 repetições. Os tratamentos utilizados foram:

- a. ADF 1: areia descartada de fundição e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 3,5$.
- b. ADF 2: areia descartada de fundição e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 7,0$.
- c. ADF 3: areia descartada de fundição e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 10,0$.
- d. FA 1: fresado de asfalto e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 3,5$.
- e. FA 2: fresado de asfalto e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 7,0$.
- f. FA 3: fresado de asfalto e água de abastecimento com $\text{pH} \approx 10,0$.
- g. AG 1: água de abastecimento com $\text{pH} \approx 3,5$.
- h. AG 2: água de abastecimento com $\text{pH} \approx 7,0$.
- i. AG 3: água de abastecimento com $\text{pH} \approx 10,0$.

4.4 ENSAIO DE SOLUBILIDADE (MÉTODO 2)

Realizou-se também o ensaio de solubilidade (método 2), adaptado da NBR 10.006 (ABNT, 2004). O material foi submerso em água deionizada, na proporção constante de 1:4, sendo 1L de água para 250g de agregado passante na peneira de #9,5 e variando o pH entre as amostras (3,5, 7,0 e 10,0). O material foi mantido em uma incubadora refrigerada, equipamento responsável por regular a temperatura, com a temperatura recomendada de $20 \pm 5^\circ\text{C}$. A coleta foi feita 3 dias e meio após a incubação, sendo o material filtrado antes de ser analisado. Não foi possível realizar a coleta nos 7 dias recomendados pela norma, devido a impossibilidade de deixar a incubadora ligada no final de semana para manter a temperatura constante. Após a coleta, o material foi passado num filtro a vácuo e o filtrado foi analisado. As análises foram feitas também para amostras apenas de água deionizada, como parâmetro de controle.

Para cada tratamento foram realizadas 2 repetições e os tratamentos utilizados foram:

- a. ADF 1: areia descartada de fundição e água deionizada com $\text{pH} \approx 3,5$.
- b. ADF 2: areia descartada de fundição e água deionizada com $\text{pH} \approx 7,0$.
- c. ADF 3: areia descartada de fundição e água deionizada com $\text{pH} \approx 10,0$.
- d. FA 1: fresado de asfalto e água deionizada com $\text{pH} \approx 3,5$.
- e. FA 2: fresado de asfalto e água deionizada com $\text{pH} \approx 7,0$.
- f. FA 3: fresado de asfalto e água deionizada com $\text{pH} \approx 10,0$.
- g. AG 1: água deionizada com $\text{pH} \approx 3,5$.
- h. AG 2: água deionizada com $\text{pH} \approx 7,0$.
- i. AG 3: água deionizada com $\text{pH} \approx 10,0$.

Os diferentes pH foram adotados considerando alguns fatores: para o pH ácido, foi escolhido um valor intermediário ao das soluções extratoras utilizadas na NBR 10.005 (ABNT 2004) de lixiviação, as quais tem o pH de 2,88 e 4,93. Estes pH são bem mais ácidos que a chuva ou a água de rios e lençóis freáticos, que seria a água de principal contato dos materiais quando dispostos na natureza, por esse motivo optou-se por analisar o comportamento dos materiais em pH neutro, ou próximo deste. Por fim, a escolha do pH alcalino foi feita com o propósito de avaliar a real influência do pH nos ensaios aos quais os materiais foram submetidos, tendo como parâmetro de comparação os extremos.

O pH foi regulado para ambos os métodos por meio de soluções ácidas e básicas. Para atingir o pH de aproximadamente 3,5 utilizou-se ácido clorídrico (HCl) de normalidade 1 N. Para o pH neutro foi utilizado pH natural da água. Para atingir o pH de aproximadamente 10,0 utilizou-se hidróxido de sódio (NaOH) de normalidade 1 N. Optou-se por não realizar o tamponamento do pH para que fosse possível analisar se o material estudado teria ou não alguma influência sobre esse parâmetro.

4.5 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS

Os parâmetros analisados no sobrenadante para ambos os ensaios no tempo zero e após o período incubado e seus respectivos métodos estão listadas no Quadro 4 apresentado abaixo.

<i>Parâmetro</i>	<i>Repetições (lixiviação)</i>	<i>Repetições (solubilidade)</i>	<i>Metodologia</i>
Cor	4	2	2120 B (APHA, 1998)
Turbidez	4	2	2130 B (APHA 1998)
pH	4	2	4500-H ⁺ (APHA 1998)
Condutividade Elétrica	4	2	2510 (APHA 1998)
Alcalinidade	4	2	2320 B (APHA 1998)
Acidez	4	2	2310 (APHA 1998)
Sulfato	4	2	4500 SO ₄ ²⁻ E (APHA 1998)
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	4	2	5220 D (APHA 1998)

Quadro 4 - Parâmetros físico-químicos analisados e respectivas metodologias de ensaio

Fonte: A autora.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os parâmetros físico-químicos (cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, acidez, sulfato e DQO) foram analisados com o auxílio do *software* RStudio, por meio do qual verificou-se a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk, realizou-se a análise de variância pelo teste F para cada parâmetro, a um nível de significância de 5%, e em seguida o Teste de Tukey para o mesmo nível de significância (RStudio Team, 2016).

O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 3x2 para a areia descartada de fundição e para o fresado de asfalto (3 valores de pH e 2 amostras)

totalizando 6 tratamentos com 4 repetições utilizando o método 1 e 2 repetições utilizando o método 2.

Após obtidos os resultados, foi analisada a contaminação da água por parte dos agregados em cada método, comparando os teores de sulfato, cor e turbidez obtidos com a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2018), qual a influência do pH nos parâmetros físico-químicos analisados e quais as diferenças observadas nos resultados obtidos para cada metodologia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS MATERIAIS

Depois de realizar os ensaios de caracterização física de acordo com as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura e Trânsito (DNIT) antigo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), obteve-se as curvas granulométricas e a caracterização física da areia descartada de fundição (Figura 5 e Tabela 1A) e do fresado de asfalto (Figura 6 e Tabela 1B).

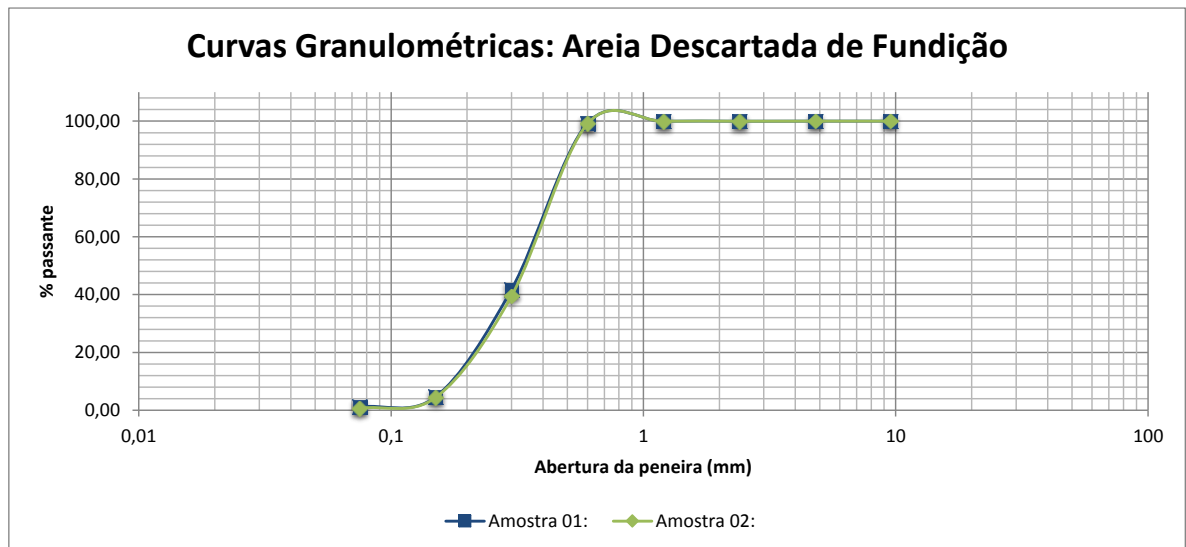


Figura 5 - Curvas Granulométricas: Areia Descartada de Fundição
Fonte: A autora.

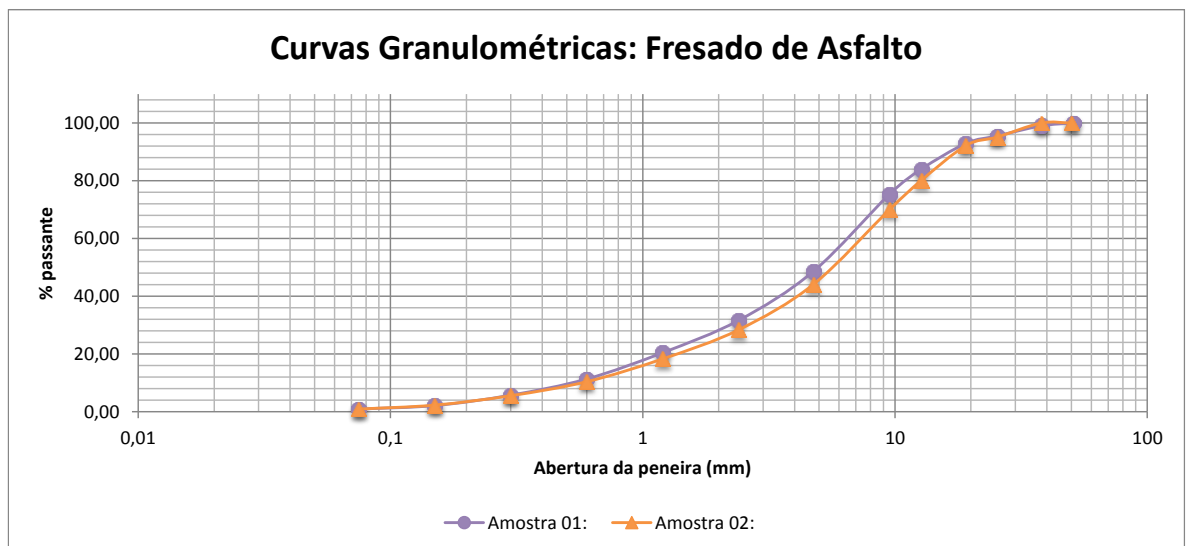


Figura 6 - Curvas Granulométricas: Fresado de Asfalto
Fonte: A autora.

Tabela 1 - Caracterização Física da Areia Descartada de Fundição e do Fresado de Asfalto

Característica	Areia Descartada de Fundição (A)	Fresado de Asfalto (B)
Diâmetro Máximo Característico (DMC)	0,6 mm	25,4 mm
Módulo de Finura (MF)	2,55	6,20
Umidade	0,34%	0,38%
Densidade	2,60	2,80

Fonte: A autora.

Para a areia descartada de fundição (ADF), através do ensaio de granulometria pode-se observar que grande parte da amostra é composta por material com diâmetro máximo de 0,6 mm, o que resulta em um material de composição majoritariamente fina. Já a umidade (0,34%) também esteve dentro do padrão esperado, entre 0,1-10,1%, visto que a areia passa por um processo a altas temperaturas, Singh e Siddique (2011) obtiveram 0,11%. A densidade (2,60) foi compatível com a encontrada na literatura, 2,589 para Siddique *et al.* (2010) e 2,18 para Singh e Siddique (2011). Variações nas propriedades físicas podem ocorrer devido a variação mineralógica da areia, bem como do tamanho, distribuição e formato das partículas e do teor de finos. Quanto melhor a distribuição e mais arredondados os grãos, maior será a densidade e a compactação dos moldes (SIDDIQUE *et al.*, 2010).

Para o fresado de asfalto, foi possível observar pelo ensaio de granulometria, que a maior parte da amostra apresenta diâmetro de 4,75 mm e 2,4 mm, resultando em um material com granulometria média para fina, visto que a maior parte da amostra ensaiada se concentrou nas peneiras de menor abertura. Pelo ensaio de umidade obteve-se 0,38%, menor que 1%, o que era esperado, pois o material vem de um processo que ocorre a altas temperaturas e sem a presença de água. A granulometria do fresado depende muito de sua aplicação e é flexível devido à possibilidade de poder britar o material para alcançar a granulometria necessária para a reciclagem. Como no processo de fresagem ocorre a quebra dos agregados, não existe uma granulometria padrão para o material antes desse ser britado, o que explica o DMC de 25,4 mm (BONFIM, 2001).

Complementando esses ensaios normatizados, realizou-se as análises de fluorescência de raios-X (FRX), onde foi possível comprovar que a ADF é composta majoritariamente de sílica (46,0%), como esperado e apresenta uma quantidade considerável de carbono (50,6%) e alumínio (2,09%). Semelhante ao encontrado por Siddique *et al.* (2010), que verificaram que seu material era composto por 87,91% de SiO₂ e 4,7% de Al₂O₃. Nenhuma análise de composição química para areia de fundição será idêntica devido ao processo onde é utilizada e

a fonte de origem, todavia esses materiais podem ser comparados por terem a mesma classificação.

A difração de raios-X (DRX) permitiu, ao sobrepor o gráfico do quartzo, comprovar que a areia utilizada para as fôrmas é quartzoza, com alto teor de sílica (LUZ e LINS, 2005). Os resultados obtidos estão apresentados, respectivamente, na Tabela 2 e na Figura 7.

Tabela 2 – Resultados da análise de FRX em óxido para Areia Descartada de Fundição.

Componente	CO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	ZrO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	Br	SO ₃	P ₂ O ₅
Resultado (%)	50,6	46,0	2,09	0,14	0,094	0,088	0,081	0,081	0,042	0,030	0,027	0,020

Fonte: A autora.

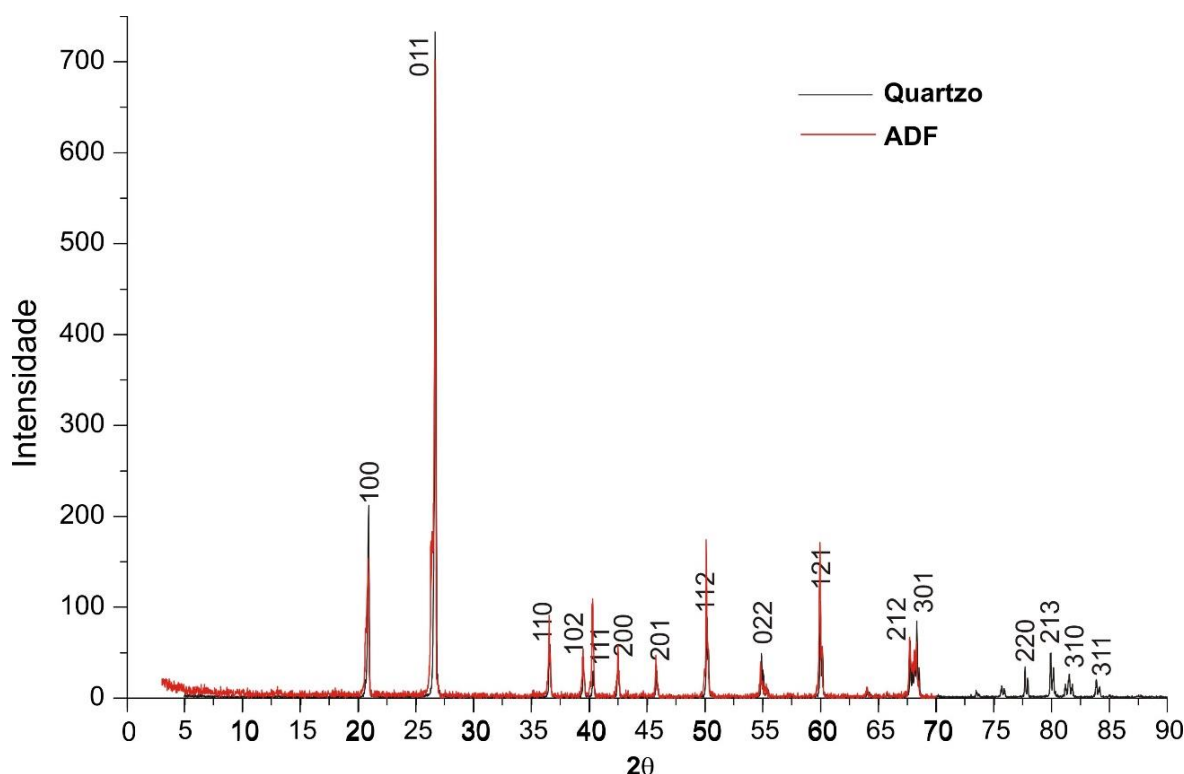


Figura 7 - Gráfico de DRX para Areia Descartada de Fundição

Fonte: A autora.

Pela microscopia eletrônica de varredura (FEG), foi possível observar a superfície e a conformação dos grãos, e comprovar juntamente com a curva granulométrica (Figura 5), como visto na literatura, que a areia e fundição é composta por uma granulometria uniforme com grãos de alta esfericidade, comumente arredondados (Figura 8A e C) e sub angulares (Figura 8B), os quais são responsáveis por garantir maior fluidez, compactação e menor resistência do que os grãos angulares (LUZ e LINS, 2005; SIDDIQUE *et al.*, 2010). As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 8.

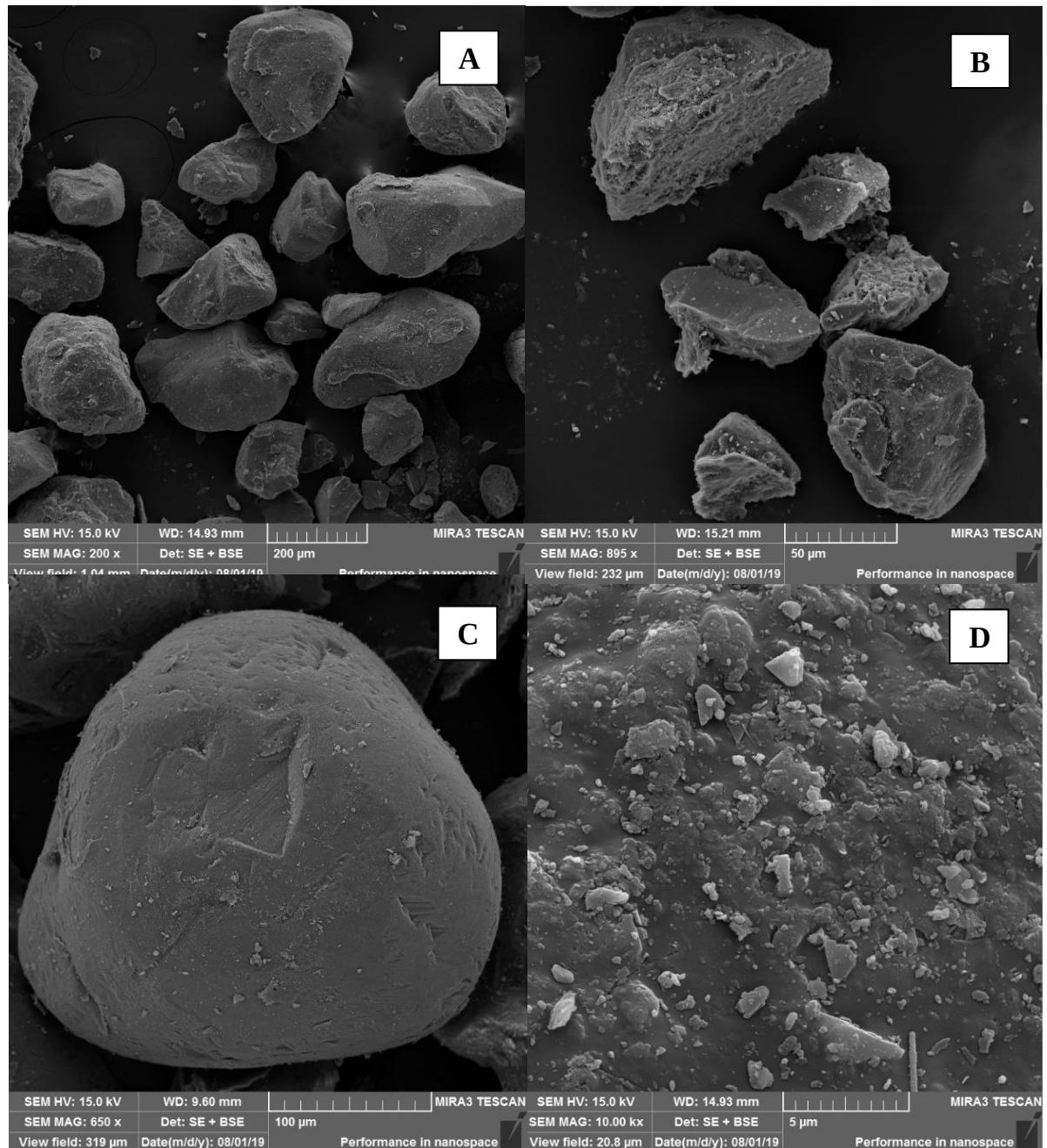


Figura 8 - Areia Descartada de Fundição pelo microscópio eletrônico de varredura (FEG). Em A, grãos arredondados de ADF; em B, grãos de ADF mais angulosos; em C, conformação arredondada de um único grão; em D, superfície do grão de ADF;
 Fonte: A autora.

Por meio da análise de espectrofotometria de fluorescência de raios-X (FRX - Tabela 3) combinada com a difração de raios-X (DRX - Figura 9) pode-se observar que o material fresado é composto predominantemente por sílica e quartzo, óxidos de ferro, plagioclásios (labradorita e bitownita) e augita todos compostos mineralógicos que caracterizam o agregado presente no fresado como diabásio (BIGARELLA *et al.*, 1985).

Segundo Bigarella *et al.* (1985), o diabásio é uma rocha ígnea, do clã do gabro classificada como básica. Essa classificação é feita de acordo com o teor de sílica que compõem

a rocha, entre 45-52%. Pelo FRX, a amostra de fresado apresentou 33,1% de SiO_2 , o qual é inferior ao intervalo de caracterização da rocha, entretanto a amostra analisada não era composta apenas de agregado e sim de uma mistura asfáltica. Portanto, a presença de outros materiais e até mesmo da aplicação do material devem ter interferido nos resultados da análise. Além disso, rochas com características básicas tendem a ser ricas em óxidos de ferro, cálcio e magnésio. Já os óxidos de alumínio, sódio e potássio são devido a presença dos feldspatos, outro componente importante do diabásio (BIGARELLA *et al.*, 1985; RODRIGUES, 1977).

Tabela 3 - Resultados da análise de FRX em óxido para o Fresado de Asfalto

Componente	CO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	TiO_2	K_2O	SO_3	Outros
Resultado (%)	35,0	33,1	10,9	7,45	6,19	2,14	1,88	1,45	0,75	0,68	< 0,5

Fonte: A autora.

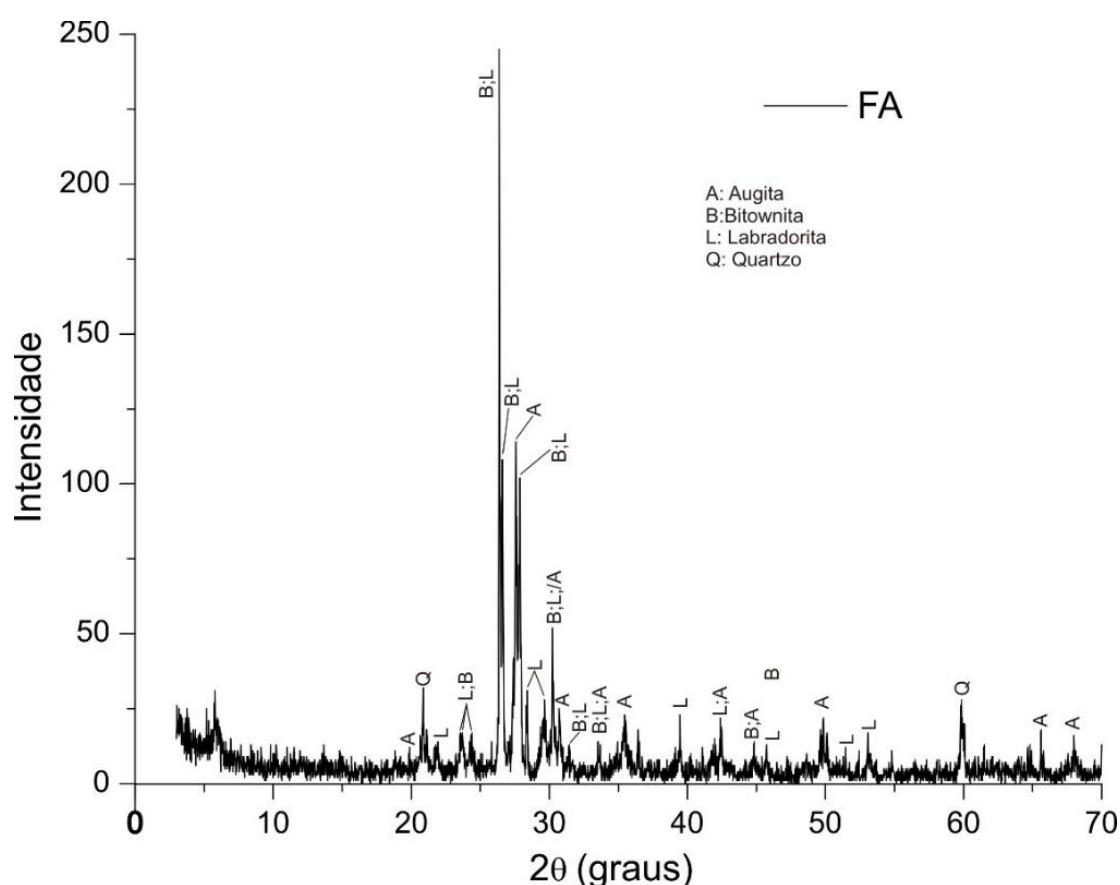


Figura 9 Gráfico de DRX para Fresado de Asfalto¹
Fonte: A autora.

¹ Fórmulas químicas: Augita = $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$; Bitownita = $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ ou $(\text{Na}_{0,3-0,1}, \text{Ca}_{0,7-0,9})\text{Al}(\text{Al}_{0,7-0,9}, \text{Si}_{0,3-0,1})\text{Si}_2\text{O}_8$; ; Labradorita = $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ ou $(\text{Na}_{0,5-0,3}, \text{Ca}_{0,5-0,7})\text{Al}(\text{Al}_{0,5-0,7}, \text{Si}_{0,5-0,3})\text{Si}_2\text{O}_8$; Quartzo = SiO_2 (Fonte: NAVARRO *et al.*, 2017)

Pela microscopia eletrônica de varredura (FEG), foi possível observar a superfície e a conformação dos grãos do fresado. Sua característica visualmente mais angulosa (Figura 10A e B) vem possivelmente do processo de fresagem em si, no qual ocorre a quebra dos agregados, o que pode ser igualmente responsável pelo depósito de pequenas partículas na superfície dos grãos (Figura 10C). As superfícies lisas se devem a película asfáltica de recobrimento dos agregados.

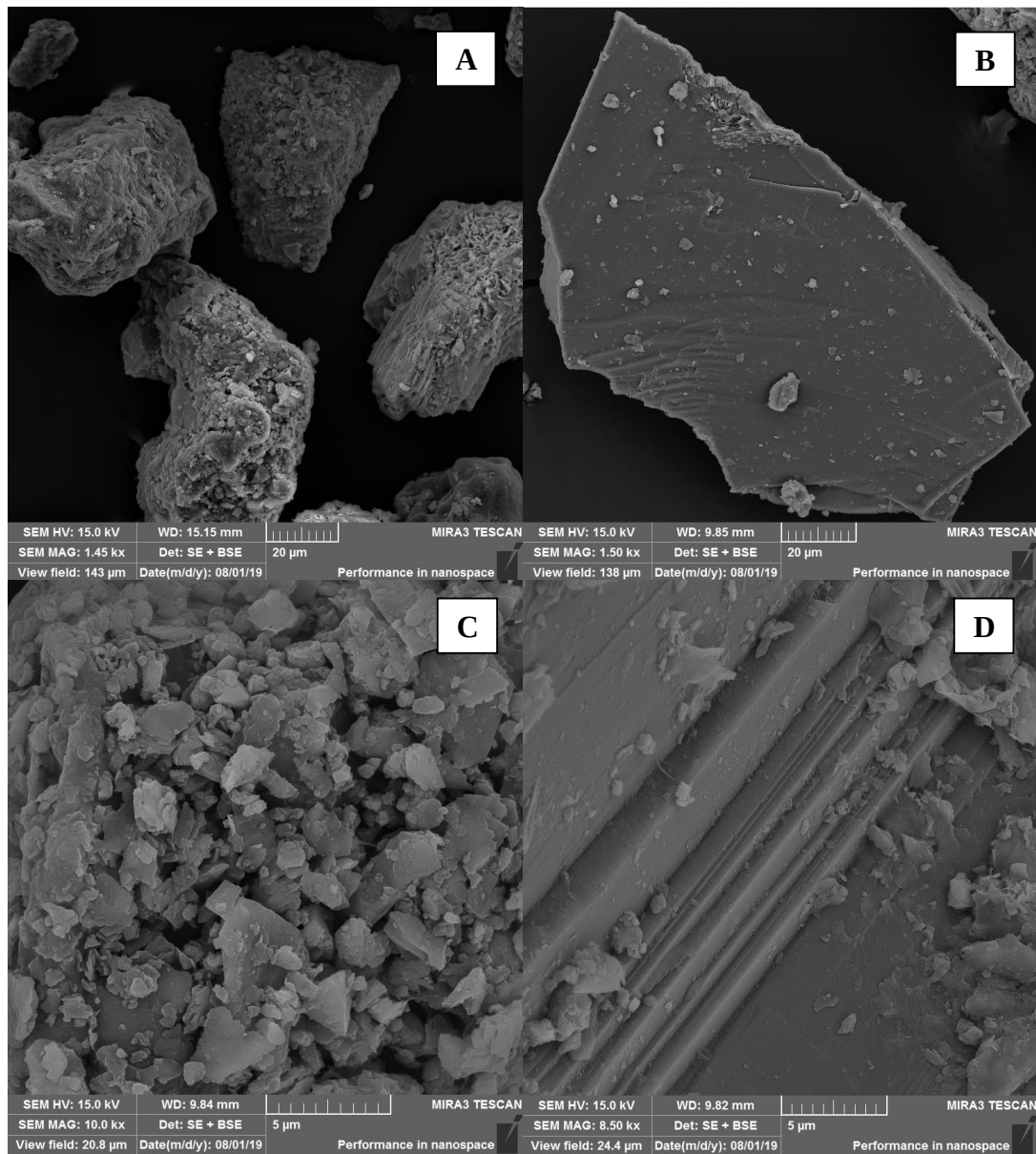


Figura 10 Fresado de Asfalto pelo microscópio eletrônico de varredura (FEG). Em A, grãos angulosos de fresado de asfalto; em B, conformação angulosa e lisa de um único grão de fresado; em C, superfície rugosa de um grão de fresado; em D, superfície lisa de um grão de fresado.

Fonte: A autora.

5.2 ANÁLISE DO EXTRATO LIXIVIADO (MÉTODO 1)

5.2.1 Areia Descartada de Fundição

No método 1, a turbidez para o pH ≈ 10 foi acima do limite estipulado, entretanto isso pode ser explicado pela possível contaminação da água de abastecimento utilizada, visto que as instalações hidráulicas do laboratório de onde se coletou a água são antigas e não receberam manutenção recente. A água neutra não se apresentou agressiva ao material, sendo os resultados de maior impacto vistos nos extremos (ácido e alcalino).

A ADF não influenciou nos pH de controle adotados para a água (Figura 11-A). Para a análise de íons sulfato (Figura 11-B), o pH neutro (7,0) e o pH alcalino (10,0) apresentaram respectivamente concentrações de $18,10 \text{ mg L}^{-1}$ e $13,45 \text{ mg L}^{-1}$, os quais não diferiram estatisticamente, enquanto para o pH ácido (3,5) apresentou concentração de $69,50 \text{ mg L}^{-1}$, sendo superior aos demais. A acidez (Figura 11-C), não foi afetada pela presença do material. Bem como a alcalinidade (Figura 11-D) da água. Sendo ambos os parâmetros influenciados apenas pelo pH pré-determinado.

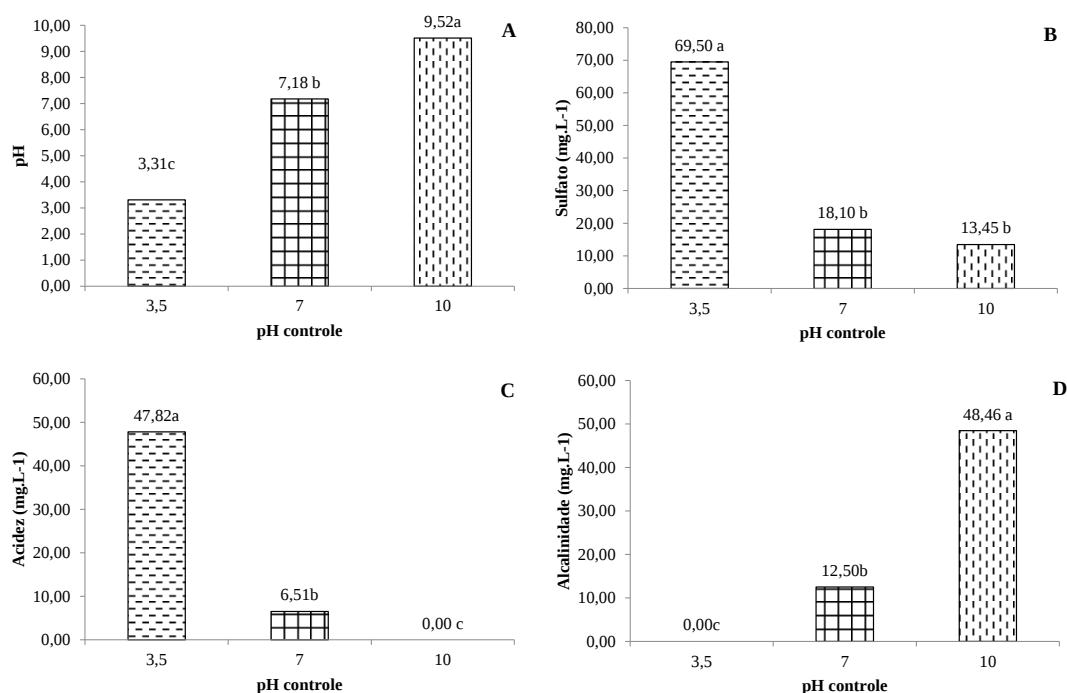


Figura 11 – Análise da influência do pH de controle no sobrenadante da ADF no ensaio de lixiviação. Em A, pH; em B, sulfato; em C, acidez; em D, alcalinidade.²

Fonte: A autora.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

² Gráficos A, B, C e D elaborados com as médias obtidas considerando juntamente a Areia Descartada de Fundição e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro.

Estatisticamente, houve uma redução da condutividade elétrica (Figura 12-A) para o pH de controle de 3,5 de $398,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ para $328,7 \mu\text{S cm}^{-1}$ devido a possível adsorção de íons, pois o pH ácido tende a agredir a superfície da areia aumentando assim a área superficial ou a permeabilidade, facilitando desta forma a adsorção. Para os outros pH ela se manteve estatisticamente constante quando comparado com a água. Para a turbidez (Figura 12-B), não houve diferença estatística para o pH de controle de 3,5, mas quanto mais alcalino, maior a turbidez liberada na água pelo agregado, portanto, para o pH de controle de 7,0 aumentou de 0,4 uT para 1,9 uT e para o pH de controle de 10,0 aumentou de 0,4 uT para 6,4 uT, sendo esse valor acima do máximo estipulado para turbidez de 5uT pelo Padrão de Potabilidade da Água do Ministério da Saúde. Para a cor (Figura 12-C), não houve liberação de cor nos pH ácido e neutro, apresentando diferença estatística apenas para o pH alcalino, no qual a cor aumentou de 0,0 uH para 2,0 uH, estando abaixo do máximo de 15 uH estipulado pelo Padrão de Potabilidade da Água do Ministério da Saúde (BRASIL,2018). Esse aumento de turbidez e cor pode ser explicado pela presença de argila na composição da areia a qual por consequência pode conter ácido húmico, o qual causa o aumento de ambos os parâmetros ou pela reação álcali-sílica (PIVELI e KATO, 2006; BRASIL, 2018; FLORINDO, 2009).

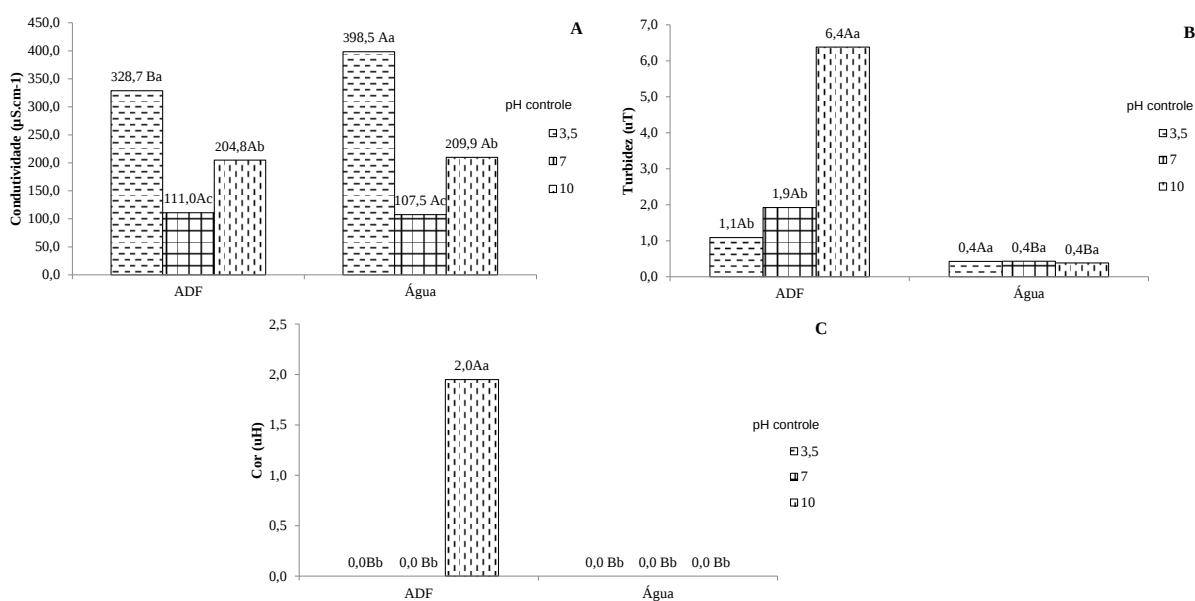


Figura 12 – Análise da influência da Areia Descartada de Fundição (ADF) e do pH de controle no sobrenadante do ensaio de lixiviação. Em A, condutividade elétrica; em B, turbidez; em C, cor.³

Fonte: A autora.

³ Gráficos A, B e C elaborados com as médias obtidas considerando separadamente a Areia Descartada de Fundição e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas se referem ao comparativo dentro dos dados do material e letras maiúsculas entre os materiais. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

5.2.2 Fresado de Asfalto

O fresado apresentou maior concentração de sulfato (Figura 14-A) do que a água, 59,3 mg L⁻¹ e 32,6 mg L⁻¹, respectivamente, sendo que para o pH de controle de 3,5 (82,3 mg L⁻¹) esse valor foi consideravelmente maior do que para os pH de controle de 7,0 (27,1 mg L⁻¹) e 10,0 (28,3 mg L⁻¹), o que pode ser observado na Figura 14-B. Essa maior liberação de sulfato no pH ácido pode ser explicada pelo Diagrama de Pourbaix (Figura 14), onde pode-se observar que a disponibilidade do íon sulfato é elevada em pH ácidos e reduzida em pH alcalinos.

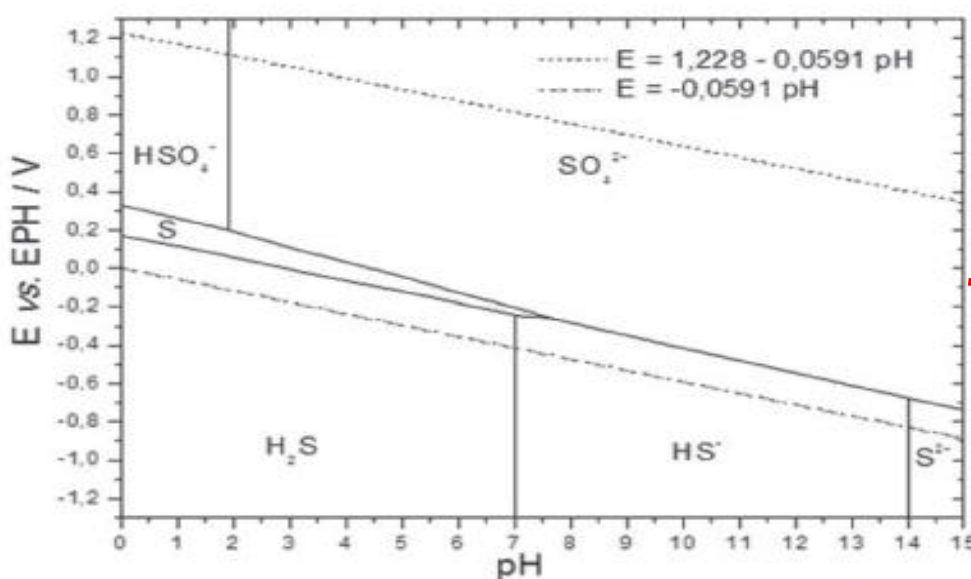


Figura 13 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema S-H₂O a 25°C. p_{H₂S} = 1,0 atm, concentração total de espécies contendo enxofre = 0,1 mol L⁻¹.

Fonte: Oliveira, *et al.*(2018)

O fresado liberou cor (Figura 14-C) na água (1,99 uH) em todos os pH (Figura 14-D), sendo que a maior concentração desse parâmetro pode ser observada para o pH mais alcalino (1,18 uH). Para a turbidez (Figura 14-E), houve um aumento do parâmetro para o sobrenadante do fresado em relação a água, de 0,41 uT para 0,62 uT, entretanto, não houve diferença significativa entre os valores de turbidez para os diferentes pH (Figura 14-F). Para ambos os parâmetros os valores não ultrapassaram a Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde, que estipula 15 uH para cor e 5uT para turbidez como valores máximos (BRASIL, 2018).

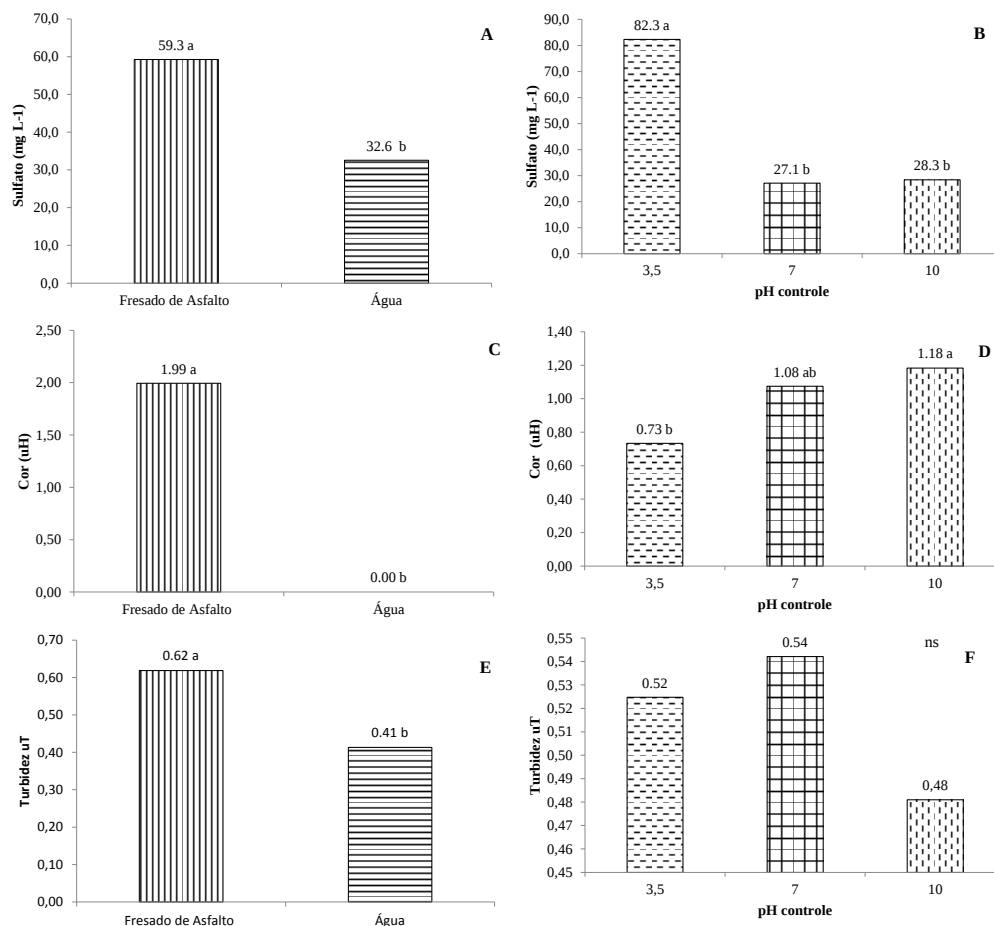


Figura 14 – Análise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de lixiviação. Em A, influência do fresado no sulfato; em B, influência do pH de controle no sulfato; em C, influência do fresado na turbidez; em D, influência do pH de controle na turbidez.⁴

Fonte: A autora.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Para o pH (Figura 15-A), o sobrenadante do fresado de asfalto não apresentou alteração para o pH neutro e alcalino em comparação com a água. Entretanto para o pH ácido, houve um aumento do pH, de 3,3 para 6,3, aproximando-o da neutralidade. Para a acidez (Figura 15-C), houve uma considerável redução quando em comparação com a água, tanto para o pH de 3,5, que reduziu de 40,8 mg L⁻¹ para 11,0 mg L⁻¹, quanto para o pH de controle de 7,0, o qual reduziu de 16,1 mg L⁻¹ para 3,9 mg L⁻¹. Esse fenômeno pode ser explicado devido a presença de feldspatos na composição química do material (principalmente Na⁺ e Ca⁺), os quais tendem a formar carbonatos e bicarbonatos, compostos altamente solúveis causando um aumento de alcalinidade (PIVELI e KATO, 2006; PAYÁ, 2013; PEREIRA, 2015;).

⁴ Gráficos B, D e F elaborados com as médias obtidas considerando juntamente o Fresado de Asfalto e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráficos A, C e E elaborados com as médias de todos os resultados obtidos para o parâmetro, considerando separadamente o Fresado de Asfalto e a água.

Ao analisar a condutividade elétrica (Figura 15-B), o fresado gerou uma redução para o pH de controle de 3,5 em comparação com água, de $398,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ para $309,0 \mu\text{S cm}^{-1}$ e um aumento para o pH de controle de 7,0, de $113,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ para $180,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ e para o pH de controle de 10,0, de $209,9 \mu\text{S cm}^{-1}$ para $262,9 \mu\text{S cm}^{-1}$. Analisando a alcalinidade (Figura 15-D), não houve diferença significativa entre os resultados obtidos para a água e para o fresado, mostrando que este não altera consideravelmente o comportamento do parâmetro.

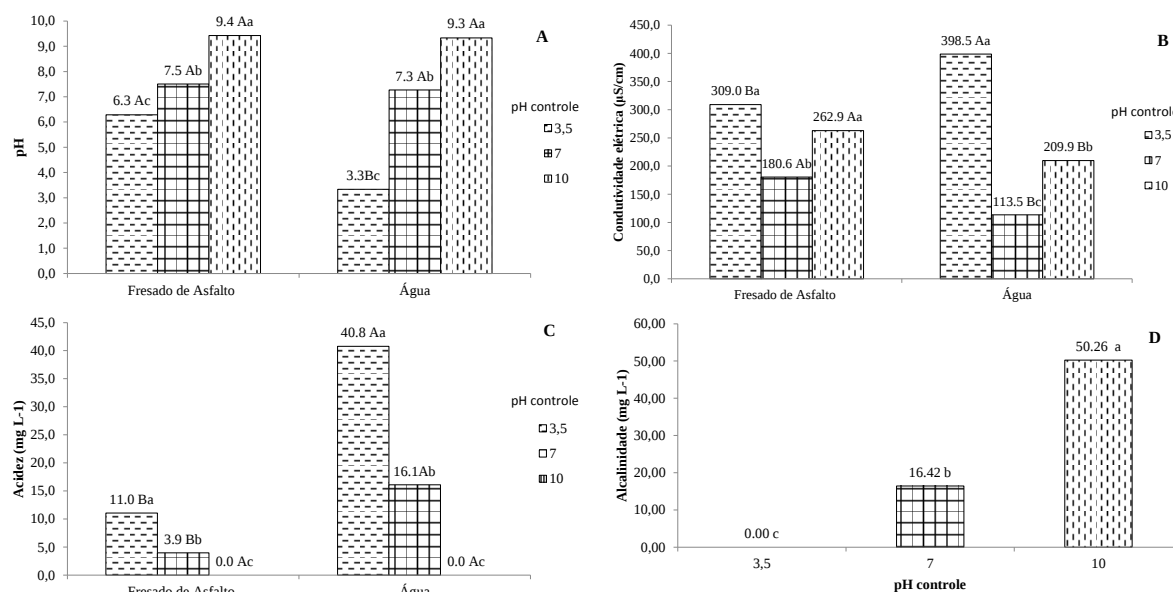


Figura 15 – Análise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de lixiviação. Em A, influência do pH de controle e do fresado no pH; em B, influência do pH de controle e do fresado na condutividade elétrica; em C, influência do pH de controle e do fresado na acidez; em D, influência do pH de controle na alcalinidade.

Fonte: A autora.⁵

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas se referem ao comparativo dentro dos dados do material e letras maiúsculas entre os materiais. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

5.3 ANÁLISE DO EXTRATO SOLUBILIZADO (MÉTODO 2)

5.3.1 Areia Descartada de Fundição

No pH ácido houve adsorção de íons, pois o pH ácido tende a agredir a superfície da areia aumentando assim a área superficial ou a permeabilidade, facilitando desta forma a adsorção, o que resulta numa redução da condutividade elétrica, do sulfato e da DQO. No pH neutro pode-se considerar que não houve contaminação comparando com os resultados obtidos para a água (tratamento de controle).

⁵ Gráficos A, B e C elaborados com as médias obtidas considerando separadamente o Fresado de Asfalto e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráfico D elaborado com as médias obtidas considerando juntamente o Fresado de Asfalto e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro.

Para o pH (Figura 18-A), o sobrenadante da areia não gerou alteração estatística nos pH ácido e neutro, entretanto, pode-se observar uma redução no pH alcalino de 8,87 para 7,79, em comparação com a água. Pode-se observar aumento na acidez (Figura 18-C) para o sobrenadante da ADF, em comparação com a água para o pH de controle de 3,5 de 24,27 mg L⁻¹ para 35,07 mg L⁻¹, já para os pH de controle de 7,0 e 10,0 a acidez se manteve estatisticamente constante. Esse fator pode ser explicado pela presença de Fe⁺ e Al⁺ na composição química do agregado (Tabela 2), pois o ferro, por exemplo, encontra-se na forma iônica Fe³⁺ e Fe²⁺, aumentando a acidez do meio, o que pode ser visto na Figura 16, onde é apresentado o Diagrama de Pourbaix exemplificando a maior disponibilidade dos íons de ferro nos pH mais ácidos (PIVELI e KATO, 2006; OLIVEIRA, 2018).

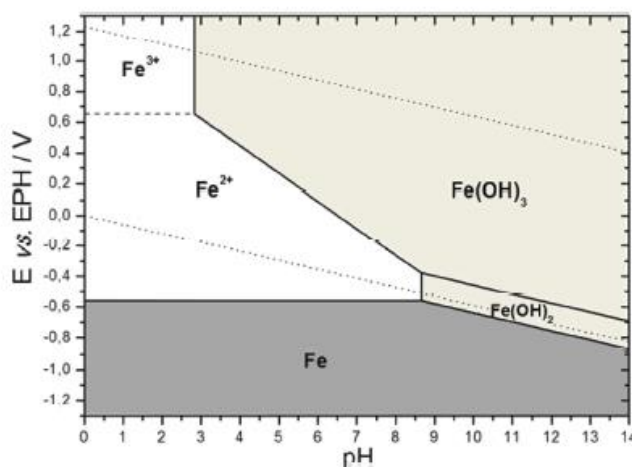


Figura 16 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Fe-H₂O a 25°C, [Fe²⁺]=10⁴ mol L⁻¹, [Fe³⁺]= 10⁻⁶ mol L⁻¹.

Fonte: Oliveira, *et al.* (2018)

Para a condutividade elétrica (Figura 18-B), houve redução para o sobrenadante da ADF no pH de controle de 3,5 de 293,0 μS cm⁻¹ para 201,4 μS cm⁻¹ e aumento para o pH de controle de 7,0 de 2,34 μS cm⁻¹ para 13,26 μS cm⁻¹, mantendo-se constante para o pH de controle de 10,0, quando em comparação com a água. A turbidez do sobrenadante da ADF (Figura 18-D) se manteve constante para o pH ácido e neutro, mas teve um aumento considerável para o pH alcalino de 0,29 uT para 2,17 uT, entretanto o valor não ultrapassa o limite máximo da Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde, que estipula 5uT de para turbidez (BRASIL, 2018).

A ADF resultou numa redução da alcalinidade (Figura 18-E) do sobrenadante quando em comparação com a água para o pH de controle de 10,0 de 21,81 mg L⁻¹ para 17,29 mg L⁻¹ e num aumento de alcalinidade para o pH de controle de 7,0 de 0,58 mg L⁻¹ para 2,52 mg L⁻¹. A ADF liberou cor (Figura 18-F) na água, levando a um aumento nesse parâmetro, de 0,12 uH para 1,37 uH. entretanto o valor não ultrapassa o limite máximo da Portaria de Potabilidade do

Ministério da Saúde, que estipula 15 uH de para cor (BRASIL, 2018). Para o sulfato (Figura 18-G), na análise do sobrenadante da ADF houve uma redução no pH de controle de 3,5 quando comparado com a água, de 62,3 mg L⁻¹ para 50,6 mg L⁻¹, e para os outros dois pH, a concentração manteve-se estatisticamente constante, quando comparado com a água. Para a DQO (Figura 18-H), não houve diferença estatística entre os valores obtidos para a água e a ADF, e não houve diferença significativa entre os resultados obtidos para os diferentes pH estudados.

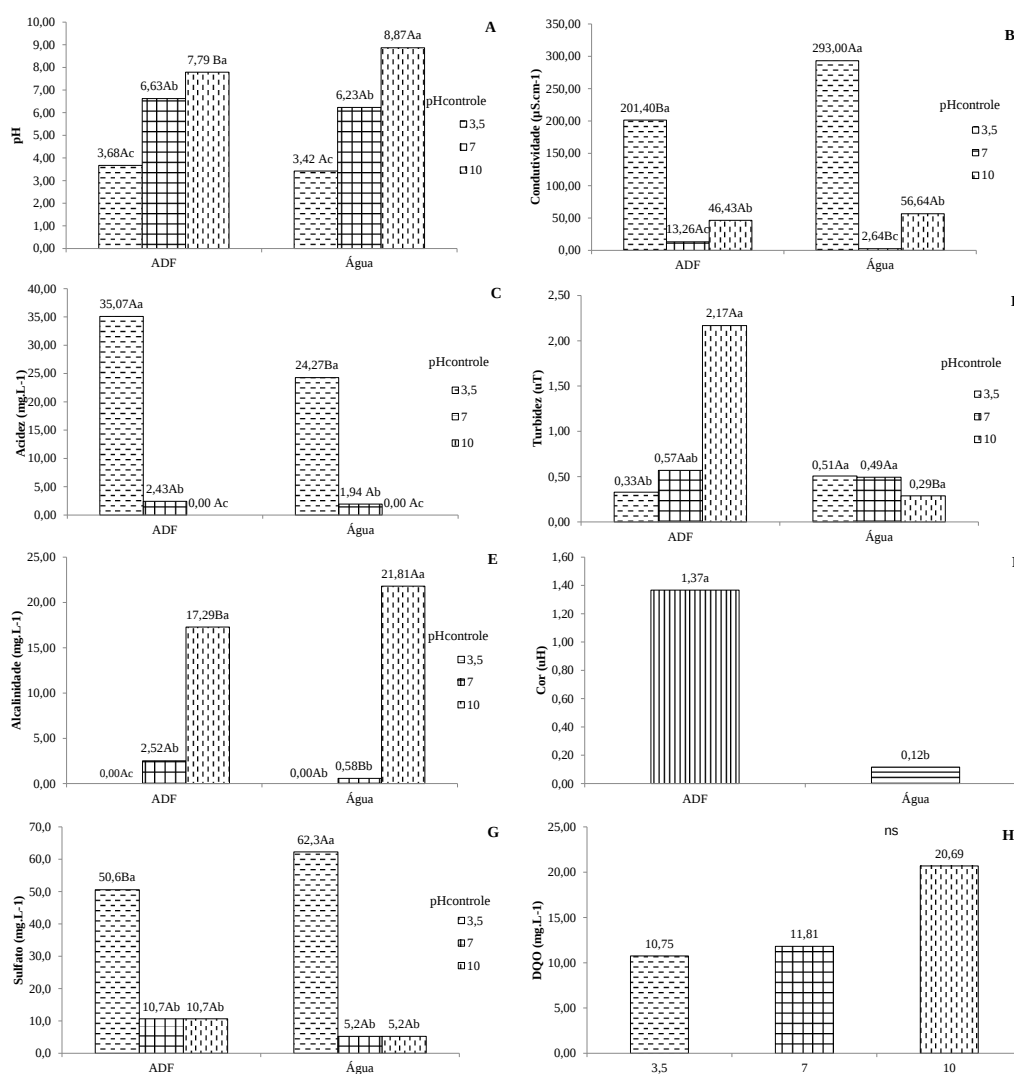


Figura 17 - Análises do sobrenadante do ensaio de solubilidade para ADF. Em A, pH; em B, condutividade elétrica; em C, acidez; em D, turbidez; em E, alcalinidade; em F, cor; em G, sulfato; e em H, demanda química de oxigênio (DQO).⁶

Fonte: A autora.

⁶ Gráficos A, B, C, D, E e G elaborados com as médias obtidas considerando separadamente a Areia Descartada de Fundição e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráfico H elaborado com as médias obtidas considerando juntamente a Areia Descartada de Fundição e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráfico F elaborado com as médias de todos os resultados obtidos para o parâmetro, considerando separadamente a Areia Descartada de Fundição e a água.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas se referem ao comparativo dentro dos dados do material e letras maiúsculas entre os materiais. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

5.3.2 Fresado de Asfalto

Para o sulfato (Figura 19-A), a concentração obtida no fresado de 80,3 mg L⁻¹ foi estatisticamente maior do que a da água de 24,3 mg L⁻¹, e entre os pH o ácido apresentou maior concentração de sulfato do que os pH neutro e básico (Figura 19-B), sendo as concentrações obtidas, respectivamente, 87,2 mg L⁻¹, 38,5 mg L⁻¹ e 31,2 mg L⁻¹. O sobrenadante do fresado apresentou cor estatisticamente maior do que a da água de controle (Figura 19-C), 6,55 uH e 0,12 uH, respectivamente, estando ambos os valores abaixo do valor máximo de 15 uH estipulado pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde (BRASIL, 2018). Quando analisada a cor do sobrenadante do fresado, não houve diferença estatística entre os pH (Figura 19-D).

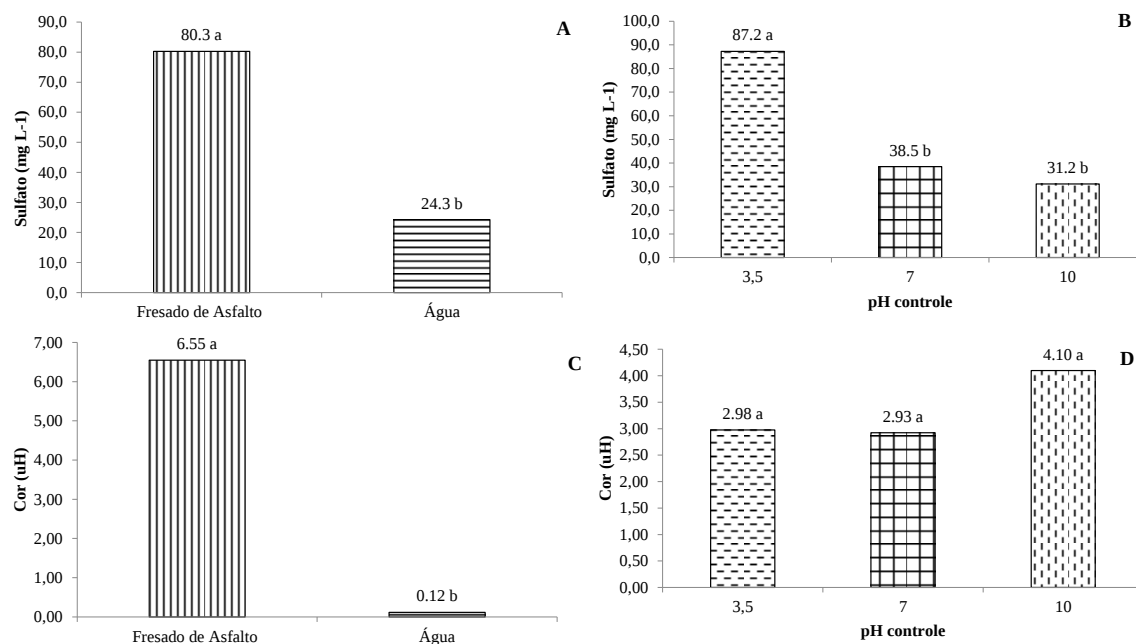


Figura 18 – Análise do sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de solubilidade. Em A, influência do fresado no sulfato; em B, influência do pH de controle no sulfato; em C, influência do fresado na cor; em D, influência do pH de controle na cor.⁷

Fonte: A autora.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Com relação ao pH (Figura 19-A) pode-se observar uma mudança significativa no sobrenadante do fresado com relação a água. O pH ácido, bem como o neutro da água foram

⁷ Gráficos B e D elaborados com as médias obtidas considerando juntamente o Fresado de Asfalto e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráficos A e C elaborados com as médias de todos os resultados obtidos para o parâmetro, considerando separadamente o Fresado de Asfalto e a água.

elevados de 3,4 para 7,6 e de 6,2 para 7,7, respectivamente, e o pH alcalino foi reduzido de 8,9 para 7,9, todos chegando a valores estatisticamente iguais dentro das análises para o fresado.

A alcalinidade (Figura 19-C) do sobrenadante do fresado se manteve estatisticamente igual para o pH de controle de 3,5 e de 10,0, entretanto, para o pH de controle de 7,0 ela aumentou de 0,6 mg L⁻¹ para 19,0 mg L⁻¹. Já para a acidez (Figura 19-D), quando se analisou o sobrenadante do fresado, pode-se observar que este manteve o valor constante para o pH de controle de 10,0 e aumentou de 1,9 mg L⁻¹ para 2,8 mg L⁻¹ para o pH de controle de 7,0 e reduziu de 24,3 mg L⁻¹ para 3,6 mg L⁻¹ para o pH de controle de 3,5.

Esse aumento da acidez pode ser explicado devido a composição química do material determinada pelo FRX (Tabela 3), onde foi visto que há Na⁺ e Ca⁺, íons que tendem a formar carbonatos e bicarbonatos. Esses compostos geram um efeito tampão no sobrenadante, elevando e estabilizando o pH de todos os tratamentos e aumentando a alcalinidade do sistema (PIVELI e KATO, 2006; PAYÁ, 2013; PEREIRA, 2015;).

Para a condutividade elétrica (Figura 19-B), no pH de controle de 3,5 o valor para o fresado se manteve estatisticamente igual ao da água, já para os pH de controle de 7,0 e 10,0 houve um considerável aumento, de 2,6 µS cm⁻¹ para 147,4 µS cm⁻¹ e de 56,6 µS cm⁻¹ para 184,4 µS cm⁻¹, respectivamente.

Quanto a turbidez (Figura 19-E), não houve diferença estatística entre o sobrenadante do fresado e da água para os pH ácido e neutro, entretanto para o pH alcalino, pode-se observar um aumento de 0,3 uT para 1,0 uT, entretanto o valor não ultrapassa o limite máximo da Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde, que estipula 5 uT de para turbidez (BRASIL, 2018). Ao analisar a DQO (Figura 19F), em geral, os resultados do fresado (37,6 mg L⁻¹) foram estatisticamente maiores do que os da água (17,0 mg L⁻¹).

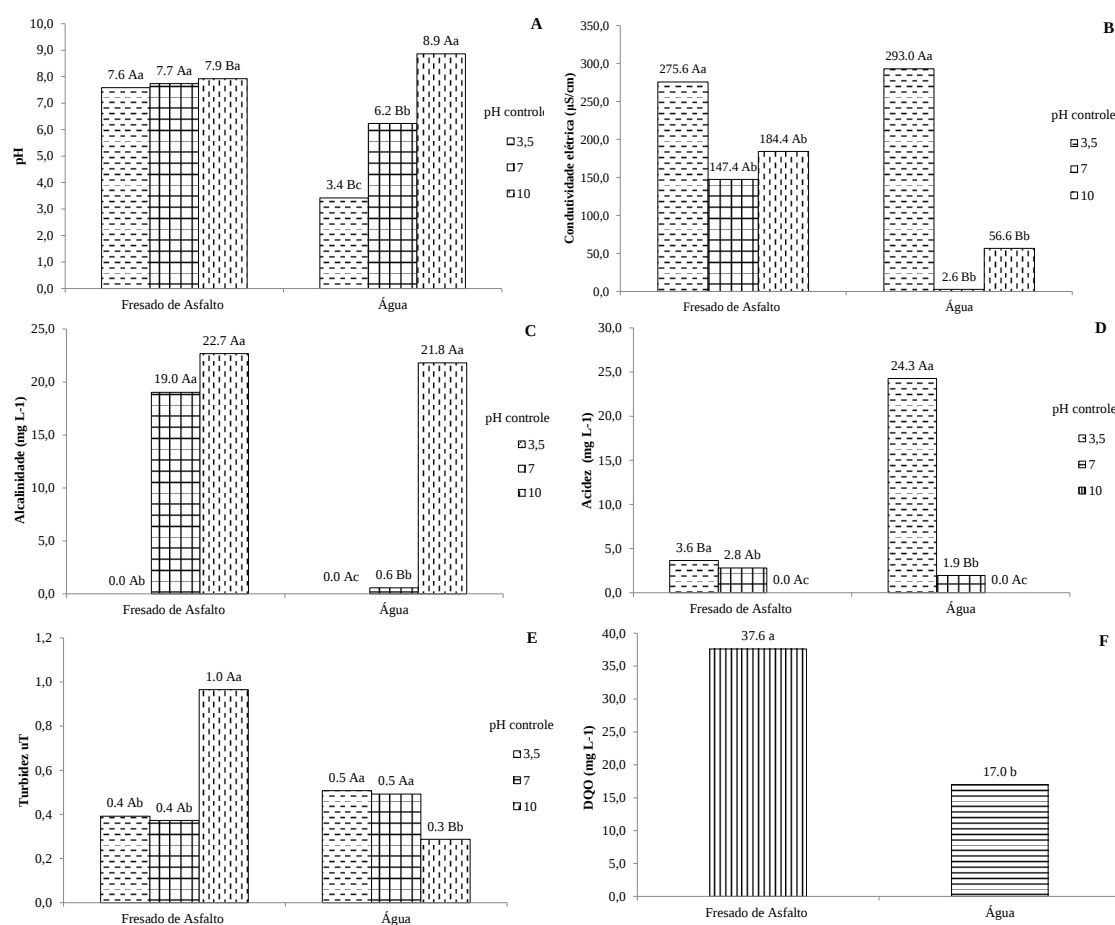


Figura 19 – Influência do fresado e do pH de controle no sobrenadante do fresado de asfalto no ensaio de solubilidade. Em A, pH; em B, condutividade elétrica; em C, alcalinidade; em D, acidez; em E, turbidez; em F, DQO.⁸

Fonte: A autora.

Nota: Dados seguidos da mesma letra não diferem 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas se referem ao comparativo dentro dos dados do material e letras maiúsculas entre os materiais. ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

5.4 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS

As principais diferenças observadas entre os métodos, que podem ter interferido nos resultados observados, foram: solução de imersão: o método 1 utilizou água de abastecimento, enquanto o método 2 utilizou água deionizada; diferentes relações água/resíduo: método 1 foi utilizada a proporção 1:5 e o método 2 utilizou a proporção 1:4; diferentes tempos de imersão: método 1 foi coletada e analisada a amostra 24 horas após o contato inicial com a solução, já no método 2 a amostra foi coletada e analisada 84 horas (3 dias e meio) após o contato inicial;

⁸ Gráficos A, B, C, D e E elaborados com as médias obtidas considerando separadamente o Fresado de Asfalto e a água, para os diferentes valores de pH dentro de cada parâmetro. Gráfico F elaborado com as médias de todos os resultados obtidos para o parâmetro, considerando separadamente o Fresado de Asfalto e a água.

temperatura: o método 1 foi mantido em temperatura ambiente (em torno de 28°C), já o método 2 foi mantido em temperatura constante (25 +/- 5°C) por meio do uso de uma incubadora.

5.4.1 Areia Descartada de Fundação

Após submeter a areia de fundição aos ensaios de lixiviação estática e solubilidade, observou-se que ambos os métodos apresentaram resultados semelhantes, exceto para condutividade elétrica, 204,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para método 1 e 29,8 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para método 2, pois o segundo método utiliza água deionizada, a qual tem condutividade menor devido à ausência de íons. A turbidez e a cor não apresentaram diferença significativa, porém a redução do método 1 para o método 2 de ambos os parâmetros, ocorreu possivelmente pela filtração no segundo que removeu de forma efetiva a turbidez. O comparativo entre os métodos pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre as metodologias para a Areia Descartada de Fundação⁹

Variáveis	Ensaio de lixiviação adaptado da Metodologia Italiana	Ensaio de solubilidade adaptado da NBR 10006	cv (%)
pH*	6,8 ns	6,0	19
Sulfato (mg L^{-1})***	31,4 ns	24,0	62
Acidez (mg L^{-1})**	16,7 ns	12,5	79
Turbidez (uT)***	2,84 ns	1,02	47
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)*	204,5 a	29,8 b	16
Alcalinidade (mg L^{-1})**	18,1 ns	9,9	70
Cor (uH)***	0,650 ns	1,367	40

Fonte: A autora.

Nota: Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo.

*Transformado pela formula $\log(x+1)$ para a estatística.

** Transformado pela formula $\sqrt{x+1}$ para a estatística.

***Transformado pela formula $1/(x+1)$ para a estatística.

5.4.2 Fresado de Asfalto

Após analisar os resultados obtidos para o sobrenadante do fresado de asfalto em ambos os métodos, não houve diferença significativa para grande parte dos parâmetros, exceto para a turbidez e cor. A turbidez reduziu de 0,63 uT para 0,47 uT, possivelmente devido a filtração no segundo método que foi eficiente na remoção dos sólidos suspensos. Já a cor aumentou de 2,28 uH para 6,55 uH, possivelmente devido a presença de óxido de ferro e manganês, os quais tem maior disponibilidade em pH neutro para ácido e provocam efeitos de

⁹ Médias apresentadas realizadas apenas com os valores obtidos para a Areia Descartada de Fundação dentro de cada parâmetro.

matéria em estado coloidal, a qual é responsável por esse parâmetro (PIVELI e KATO, 2006; MALAVOLTA, 1989). Na Tabela 5 é possível observar o comparativo entre os métodos.

Tabela 5 – Comparação entre as metodologias para o Fresado de Asfalto¹⁰

Variáveis	Ensaio de lixiviação adaptado da Metodologia Italiana	Ensaio de solubilidade adaptado da NBR 10006	cv (%)
pH	7,55 ns	7,75	18
Sulfato (mg L ⁻¹)*	66,95 ns	80,30	11
Acidez (mg L ⁻¹)	3,77 ns	2,14	42
Turbidez (uT)**	0,63 a	0,47 b	4
Condutividade (µS cm ⁻¹)	250,8 ns	202,43	28
Alcalinidade (mg L ⁻¹)	23,80 ns	13,90	99
Cor (uH)*	2,28 b	6,55 a	24

Fonte: A autora.

Nota: Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo.

*Transformado pela formula $\log(x+1)$ para a estatística.

** Transformado pela formula $\sqrt{x+1}$ para a estatística.

¹⁰ Médias apresentadas realizadas apenas com os valores obtidos para o Fresado de Asfalto dentro de cada parâmetro.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram observadas:

- Dentre os parâmetros analisados ambos os resíduos foram considerados não contaminantes, apresentando valores abaixo dos estipulados pela Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2018), sendo os máximos para sulfato de 250 mg.L⁻¹, para cor 15 uH e para turbidez 5 uT, tanto para o fresado como para a areia de fundição (ADF) nos dois métodos. Podendo a ADF ser enquadrada como resíduo não perigoso de acordo com o Anexo H da NBR 10.004 (ABNT, 2004) para os parâmetros avaliados.

- O aumento no pH resultou num aumento de cor e turbidez tanto para a ADF quando para o fresado em ambos os métodos, sendo o maior valor para ambos os parâmetros observado no pH alcalino.

- A ADF apresentou caráter mais ácido no segundo método, gerando alterações no parâmetro da acidez e do pH.

- A ADF e o Fresado apresentaram caráter adsorptivo para o pH ácido, sendo que para o primeiro essa característica pode ser observada nos dois métodos e para o segundo observou-se apenas no método 2.

- Especialmente no método 2, o fresado apresentou caráter alcalino e tamponante, estabilizando o pH das soluções.

- Para o sulfato, sua maior concentração para ambos os materiais estudados foi no pH ácido, sem diferir significativamente do valor encontrado para a água de controle.

- Os resultados obtidos para os parâmetros físicos e composições químicas foram os esperados para a classificação de cada material.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir foram relacionadas algumas sugestões para trabalhos futuros, contemplando pontos que não foram abordados neste trabalho:

- Analisar os materiais separadamente, focando em suas características exclusivas.
- Analisar a concentração de metais no extrato lixiviado e solubilizado dos materiais e ver se tais concentrações se enquadram nos limites estabelecidos;
- Realizar as mesmas análises para o agregado graúdo antes de ser utilizado para composição da mistura asfáltica que resulta no fresado e para o agregado miúdo antes de ser utilizado na indústria de fundição, podendo estabelecer se os contaminantes advém do processo ou do material.
- Analisar quimicamente as interações entre a composição dos materiais e as reações que ocorrem em cada meio, podendo assim estabelecer precisamente quais os compostos responsáveis pelos resultados obtidos para cada parâmetro;
- Analisar outros parâmetros que são avaliados pela Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2018), como dureza total, sólidos dissolvidos totais, cloreto, alumínio, ferro, manganês, zinco, entre outros, e comparar com os limites máximos;
- Estudar a viabilidade de aplicações alternativas do material, como por exemplo, o uso da ADF em filtros de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), concretos não estruturais, entre outros.

8 REFERÊNCIAS

AGGARWAL, Y., SIDDIQUE, R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 54, p. 210-223, 2014.

AGOURAKIS, D. C., CAMARGO, I. M. C., COTRIM, M. B., FLUES, M. Comportamento de zinco e manganês de pilhas alcalinas em uma coluna de solo. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 29, n. 5, p. 960-964, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422006000500014>. Acesso em: 27 mai. 2019

AMMEN, C.W. **Metalcasting**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 435 p.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20. ed. New York DC, 1998. 1569 p.

ARULRAJAH, A., YAGHOUBI, E., IMTEAZ, M., HORPIBULSUK, S. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: engineering and environmental evaluation. **Sustainable Cities and Society**. v. 28, p. 343-340, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 10.006 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 11.174 Armazenamento de resíduos classes II – não inertes e III – inertes**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

BIGARELLA, J. J., LEPREVOST, A., BOLSANELLO, A. **Rochas do Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985. 310 p.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 2. ed. São Paulo: Liege Beatriz Soldano, 2001. 111 p.

BRANTLEY, A. S., TOWNSEND, T. G. Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement. **Environmental Engineering Science**. v. 16, n. 2, jan. 1999.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 de agosto de 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 2 mai. 2019.

BRASIL. Portaria de consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Diário Oficial da União**. Brasília, 28 de setembro de 2018. Disponível em: <bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em 8 mai. 2019.

BRASIL. Resolução nº 307, de 5 de julho de 202. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 3 de mai. 2019.

CAMINHO sustentável para as areias descartadas de fundição evolui. **ABIFA**, São Paulo, n. 171, ano 17, p. 20-22, ago. 2014.

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, n. 3, p 547-565, set/dez. 2010.

CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; FELIZARDO, C. C.; MEIRA, N. Dos S.; DOMINGUINI, L.; BETIOLI, A. M. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 261-279, jan/mar. 2018.

CENSUS of world casting production: global casting production expands. **Modern Casting**, Schaumburg, p. 23-26, dec. 2018.

CNT, SEST, SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias: relatório gerencial**. CNT: Brasília, 2018.

CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** CNT, 2017.

DA SILVA, W. R. L., OLIVEIRA, A. L., PRUDÊNCIO JR, L. R., TOCHETTO, E. Influência do emprego de areia de fundição residual nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v. 4, n. 4, p. 652-663, out. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 083 Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

_____. **ME 084 Agregado Miúdo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

_____. **ME 192 Agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DYER, P. P. O. L., LIMA, M. G., KLINSKY, L. M. G, SILVA, S. A., COPPIO, G. J. L. Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures. **Construction and Building Materials**. v. 17, p. 474-484, 2018.

ETXEBERRIA, M., PACHECO, C., MENESES, J. M., BERRIDI, I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 1594-1600, 2010.

FAGUNDES, A. B., DA SILVA, M. C. Ciência, tecnologia e ambiente: normas e regulamentações para areias descartadas de fundição (ADF). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA E SOCIEDADE (TECSOC), 4, 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba:

UTFPR, 2011. Disponível em: <www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/.../84ciencia_ta_areias_descart.pdf>. Acesso em 19 maio 2018

FERREIRA, J. M. G. C. **Tecnologia da Fundição**. 1. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999. 544 p.

FLORINDO, R. N. **Estudo da reação álcali-silica em concretos através de ressonância magnética nuclear de alta resolução**. 2009, 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) o Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GAIVIZZO, L. H. B., VIDOR, C. TEDESCO, M. J. MEURER, E. Potencial poluidor de rejeitos carboníferos. I – Caracterização química da água de lixiviação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 5, p. 771-780, 2002.

GONG, Y., GRANT, D. J. W., BRITTAIN, H. G. Principles of Solubility. In: AUGUDTIJNS, P. BREWSTER, M. E. **Solvent Systems and Their Selection in Pharmaceutics and Biopharmaceutics**. 1 ed. Springer Science+Business Media: New York, 2007. Cap. 1. p. 1-28.

GOODHEW, P. J., HUMPHREYS, J., BEANLAND, R. **Electron microscopy and analysis**. 3 ed. New York: Taylor & Francis, 2001. 251 p.

GUNEY, Y., SARI, Y. D., YALCIN, M., TUNCAN, A. DONMEZ, A. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**. v. 20, p. 1705-1713, 2010.

IAP. **Relatório Jan/2004-Mai/2009**. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Paraná. Jun, 2009.

INDUSTRIA brasileira do aço acredita em recuperação em 2019. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/industria-brasileira-do-aco-acredita-em-recuperacao-em-2019/>>. Acesso em 1 mai. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **ES 159 Pavimentos asfálticos - fresagem a frio - especificações de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2011.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed., v. 720, Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

ITÁLIA. Decreto Ministerial de 5 de fevereiro de 1998. Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n° 22. **Suplemento ordinário do Diário Oficial nº 88**, 16 abr. 1998.

JENKINS, R. **X-ray fluorescence spectrometry**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 207 p.

KESTENBACH, H-J., BOTTA FILHO, W. J., **Microscopia Eletrônica: transmissão e varredura**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1994. 104 p.

KLINSKY, L. M. G., BARDINI, V. S. S., FURLAN, A. P., FABBRI, G. T. P. Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente. **Revista Transportes**. v. 20, n. 4, p. 27-35, 2012.

KRÜGER, P., CABRAL, L. A., SOUZA, V. F. C. Confecção de argamassa utilizando areia residual do processo de fundição. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 5, n. 3, p. 45-53, out. 2013.

LEGRET, M., ODIE, L. DEMARE, D. JULLIEN, A. Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. **Water Research**. v. 39, n. 15, p. 3675-3685, set. 2005.

LUZ, A. B., LINS, F. F. Areia industrial. In: CETEM-MCT. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2005. 726 p.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. Editora Agronômica CERES, São Paulo, 1989.

MALISHEV, A., NIKOLAIEV, G., SHUVALOV, Y. **Tecnologia dos metais**. 1. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1970. 444 p.

MARTINS, C. R., LOPES, W. A., ANDRADE, J. B. Solubilidade das substâncias orgânicas. **Quim. Nova**. São Paulo, v. 36, n. 8, p. 1248-1255, jul. 2013.

MIKAMI, R. J. **Lixiviação de sulfato e metais pesados em concreto permeável produzido com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. 2017, 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

NAVARRO, G. R. B., ZANARO, A., MONTIBELLER, C. C., LEME, T. G. Augita. In: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert. **Livro de Referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: INOSSILICATOS**. Rio Claro: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/mineral/augita-augite/>>. Acesso em: 27 nov. de 2019.

NAVARRO, G. R. B., ZANARO, A., MONTIBELLER, C. C., LEME, T. G. Bytownita. In: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert. **Livro de Referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: TECTOSSILICATOS**. Rio Claro: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/mineral/bytownita-bytownite/>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

NAVARRO, G. R. B., ZANARO, A., MONTIBELLER, C. C., LEME, T. G. Labradorita. In: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert. **Livro de Referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: TECTOSSILICATOS**. Rio Claro: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/mineral/labradorita-labradorite/>>. Acesso em: 27 nov. de 2019.

NAVARRO, G. R. B., ZANARO, A., MONTIBELLER, C. C., LEME, T. G. Quartzo. In: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert. **Livro de Referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: TECTOSSILICATOS**. Rio Claro:

Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/mineral/quartzo-quartz/>>. Acesso em: 27 nov. de 2019.

NETO, B. C., FABBRI, G. T. P. Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. **Revista Transportes**. v. 12, p. 50-57, dez. 2004

NORIN, M., STRÖMVAIX, A-M. Leaching of organic contaminants from storage of reclaimed asphalt pavement. **Environmental Technology**. v. 23, n. 3, p. 323-340, fev. 2004.

OLIVEIRA, M. C., LIMA, A. P., FIGUEIREDO, R. M., ACCIARI, H. A., CODARO, E. N. Um estudo termodinâmico da corrosão dos aços carbono pelo sulfeto de hidrogênio – explorando conceitos de equilíbrio químico. **Química Nova**. São Paulo, v. 41, n. 5, p. 594-599, jan. 2018.

PASCHE, E., SPECHT, L. P., TANSKY, M. C., CONSOLI, N. C. Avaliação da rigidez de misturas recicladas cimentadas: abordagem elástica e viscoelásticas. **Revista Transportes**. v. 26, n. 1, p. 94-107, abr. 2018.

PAYÁ, S. C. **Áridos reactivos em hormigones de presa. Reacción sulfática com formación de thaumasita**. 2013, 204 f. Tesis Doctoral – Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, Alicante, Espanha, 2013.

PENKAITIS, G., SÍGOLO, J. B., Waste foundry sand. Environmental implication and characterization. **Geologia USP: série científica**. São Paulo, v. 12, n. 3, p. 57-79, dez. 2012.

PEREIRA, E. **Investigação e monitoramento do ataque por sulfato de origem interna em concretos nas primeiras idades**. 2015, 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PIVELI, R. P., KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2006.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos**. 2009, 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

RAJU, K. V. S. B., PAI, G. M. MURTHY, N. ANIRUDHA, K. V., RAO, P. R. Geotechnical Characterization of Miscellaneous Waste. In: INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2010, Mumbai. **Anais eletrônicos...** Mumbai: GEOTrendz, 2010, p. 53-56. Disponível em: <<https://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/013.pdf>>. Acesso em 9 mar. 2019.

RODRIGUES, J. C. **Geologia para engenheiros civis**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 206 p.

RStudio Team; RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA, 2016. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em 19 set. 2019

SANTA CATARINA. Resolução CONSEMA nº 26, de 06 de setembro de 2013. Estabelece diretrizes sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundição – ADF e adota outras

providências. **Diário Oficial do Estado**, Florianópolis, 16 de setembro de 2013. Disponível em: <www.sds.sc.gov.br/index.php/biblioteca/432-resolucao-consema-no-262013>. Acesso em: 15 de mar. 2019.

SANTOS, A. V., RODRIGUES, A. MARCHETTI, M. C., CASARIN, V. A. Reaproveitamento de areia de fundição descartada em substituição da areia natural na fabricação de blocos estruturais de concreto. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGICAL INNOVATION, 7, 2016, Aracaju. **Anais eletrônicos...** Aracaju: ISTI/SIMTEC, 2016, v. 3, n. 1 p. 541-546. Disponível em: <<http://www.api.org.br/conferences/index.php/ISTI2016/ISTI2016/paper/view/46/64>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Volume II. 2. ed. São Paulo: Pini, 2006. 671 p.

SIDDIQUE, R., KAUR, G., RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 54, n. 12, p. 1027-1036, out. 2010.

SIDDIQUE, R., SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 55, p. 885-892, 2011.

SINGH, G., SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**. v. 28, p. 421-426, 2012.

SINGH, G., SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 26, p. 416-422, jul. 2011.

SOLOMAZ, P.; GEDIK, A.G.; LAV, M.A.; LAV, A.H. Utilization of waste foundry sand as impermeable layer (drainage blanket) for pavement structures. In: **Advances in transportation geotechnics: proceedings of the international conference on transportation geotechnics**. 1. ed. Florida: CRC Press, 2008. p. 263-268

TAYLOR, L. R., PAPP, R. B., POLLARD, B. D. **Instrumental Methods for Determining Elements**. 1. ed. New York: VCH Publisher, 1994. 322 p.

VAN DER VEM, M. F. C., MOLENAAR, A. A. A., POOT, M. R. Asphalt mixtures with waste materials: possibilities and constraints. In: CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA, 10, 2011, KwaZulu-Natal. **Publication...** KwaZulu-Natal: ARRB Group Ltd, 2011. p. 1-14.

VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004. 400 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. 470 p.