



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)
CENTRO TECNOLÓGICO (CTC)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

RELATÓRIO FINAL INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC 2019/2020

**MEDIÇÃO E CONTROLE DE EMISSÕES NA PRODUÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS EM USINAS DE ASFALTO**

BOLSISTA: JEFFERSON CANDIDO
ORIENTADORA: LISEANE PADILHA THIVES

2020

Resumo

O aquecimento global é um problema ambiental mundial e se deve principalmente pela elevada concentração dos gases do efeito estufa. As misturas asfálticas utilizadas como revestimento de pavimentos flexíveis são produzidas em unidades industriais denominadas de usinas de asfalto. No Brasil, não há protocolo estabelecido para controle e medições de poluentes nas usinas de asfalto. O controle e quantificação das emissões de gases de efeito estufa nestes locais são necessários e importantes. Este relatório apresenta o sumário das atividades de iniciação científica desenvolvidas no âmbito do projeto “Medição e controle de emissões na produção de misturas asfálticas em usinas de asfalto” no período 2019/2020. Inicialmente foi realizada uma ampla revisão de literatura sobre o tema e avaliados protocolos de controle de emissões neste tipo de unidade industrial estabelecidos em outros países. Como resultado, foi possível descrever os tipos de usinas de asfalto, bem identificar as fontes poluidoras. Após a identificação dos principais gases do efeito estufa emitidos em usinas de asfalto, foram estabelecidos os equipamentos de medição ideais para este propósito. Posteriormente, foram identificadas usinas no Estado de Santa Catarina, quanto ao tipo, quantidade de produção e combustível utilizado. Por meio dos dados coletados e através do uso de calculadoras de poluentes, o quantitativo de emissões foi mensurado. Os resultados mostraram que as usinas de asfalto são potenciais poluidoras e emissoras de gases do efeito estufa.

Palavras-chave: Usinas de asfalto. Emissões. Gases de Efeito Estufa.

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta o sumário das atividades de iniciação científica realizadas no âmbito do projeto de pesquisa intitulado “Medição e controle de emissões na produção de misturas asfálticas em usinas de asfalto”. A iniciação científica do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica para ensino superior foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no período de 2019/2020.

Por muitos séculos, do Planeta Terra tem-se extraído todos os recursos naturais sem qualquer preocupação com a sustentabilidade. Posteriormente, com a era industrial, da mesma forma, diversos poluentes foram emitidos na atmosfera.

Com a crescente conscientização e preocupação voltada ao desenvolvimento sustentável, diversas iniciativas mundiais têm sendo tomadas para minimização de problemas relativos à poluição ambiental e sustentabilidade do planeta.

As principais iniciativas, em nível mundial, foram estabelecidas por meio do Protocolo de Quioto criado em 1997 e conferências realizadas pela Organização das Nações Unidas

(ONU), cujo principal tema foi a respeito das mudanças climáticas. De acordo com de Aquino *et al.* (2015), estas iniciativas representam um avanço positivo, que abriram perspectivas para que recursos externos aos países com baixo índice de desenvolvimento sustentável possam contribuir para reduzir o efeito estufa.

López *et al.* (2016) complementam que a ratificação em fevereiro de 2005 do protocolo de Quioto de 1997, trouxe não só requisitos para redução de emissões em processos de produção com alto consumo energético, como também um desafio significativo para engenharia. Para Silva e Mendes (2005) o conceito ideológico que permeia a dimensão de desenvolvimento sustentável conciliando-se com a decisão de custo versus benefícios, retoma a necessidade de repensar como produzir e aproveitar de forma eficiente os recursos, sendo estes escassos e limitados, enquanto as necessidades ilimitadas.

Rubio *et al.* (2013) afirmaram que entre as fontes geradoras e de contribuição com emissões de poluentes atmosféricos, pode-se incluir o setor rodoviário com a utilização, fabricação, disseminação e conservação de misturas de asfalto a quente.

Neste contexto se inserem as usinas de asfalto como unidades industriais poluidoras. Este trabalho tem como objetivo geral a identificação e avaliação da medição de gases do efeito estufa, bem como os tipos de poluentes emissivos.

Como objetivos específicos têm-se a identificação dos tipos de usinas de asfalto e as fontes poluidoras, avaliação dos principais gases do efeito estufa emitidos por estas unidades industriais e a forma de medição.

O efeito estufa é uma função da concentração de vapor de água, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e outros gases em menor proporção, que tem por função a absorção da radiação terrestre. Quanto mais gases de efeito estufa são emitidos à atmosfera, mais o calor irradiado encontra dificuldades para dispersar-se no espaço, provocando o aumento anormal das temperaturas e reafirmando a teoria do aquecimento global. Embora o efeito estufa seja um fenômeno natural e necessário para a preservação da vida na Terra, as atividades antrópicas tem causado seu aumento, que como consequência, contribui para o aquecimento global (IPCC, 2014).

O aquecimento global é o aumento significativo das temperaturas médias do planeta no decorrer dos últimos tempos, fruto das atividades humanas, cuja principal implicação é a intensificação do efeito estufa (SILVA *et al.*, 2006).

O gás do efeito estufa mais abundante é o dióxido de carbono (CO₂), produto de queima de combustíveis fósseis.

As misturas asfálticas a quente são os principais materiais industrializados utilizados na pavimentação de estradas. Uma mistura asfáltica consiste no envolvimento de agregados minerais com cimento asfáltico líquido em altas temperaturas que variam entre 150°C a 180°C (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os dois tipos principais são as usinas gravimétricas, por batelada ou *batch-mixer* (Figura 1) e as volumétricas, contínuas ou *drum-mixer* (Figura 2). As usinas contínuas podem ser ainda de fluxo paralelo ou de contrafluxo.

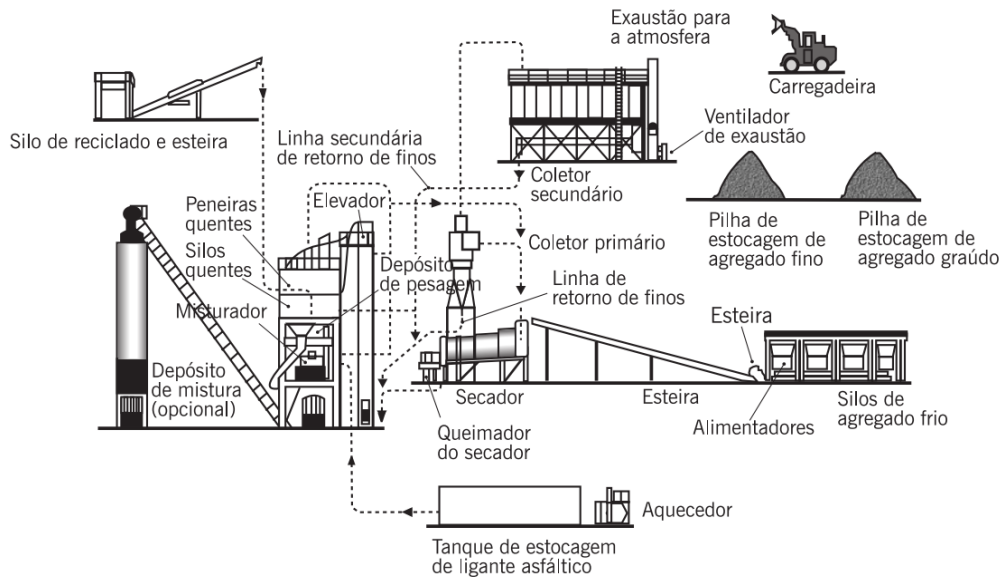


Figura 1. Usina gravimétrica ou *batch-mixer* (Baseado em EPA, 2000).

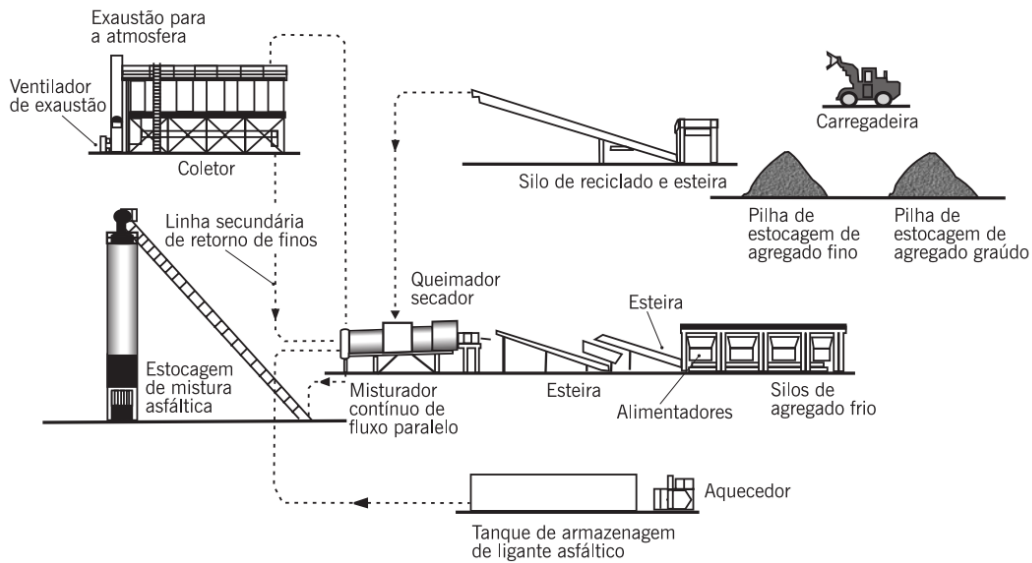


Figura 2. Usina volumétrica ou *drum-mixer* (Baseado em EPA, 2000).

Nas usinas gravimétricas (Figura 1), o agregado proveniente das pilhas de estocagens é levado aos silos frios para posterior aquecimento no tambor secador. Após os agregados quentes são peneirados e transferidos para um misturador onde o asfalto líquido é injetado. No caso das usinas volumétricas, a secagem e aquecimento dos agregados, bem como a mistura são realizadas no tambor secador (EPA, 2000). Ainda, nestas usinas, se o agregado proveniente dos silos frios entrarem no tambor secador na mesma direção do local da chama, tem-se o fluxo paralelo e se for em direção oposta, contrafluxo. As principais diferenças entre os dois tipos são ilustradas na Figura 3.

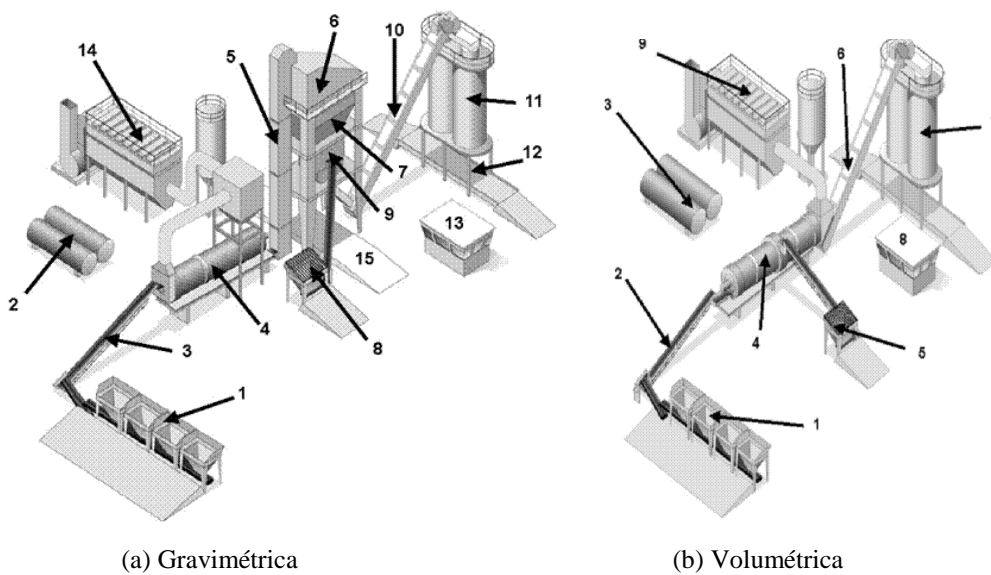


Figura 3. Diferenças entre os tipos de usinas (Baseado em Bernucci *et al.*, 2008).

Legendas da Figura 3

Usina gravimétrica

1. Silos frios
2. Depósito de ligante asfáltico
3. Correia alimentadora
4. Secador / aquecedor
5. Elevador quente
6. Peneirador / separador
7. Silos quentes de agregados
8. Alimentador de reciclado
9. Entrada de ligante e misturador
10. Correia transportadora
11. Silos quentes da mistura
12. Área de carregamento do estocado
13. Sala de controle
14. Sistema de controle e filtragem de gases e pó
15. Área de carregamento direto

Usina volumétrica

1. Silos frios
2. Correia alimentadora
3. Depósito de ligante asfáltico
4. Tambor secador, aquecedor e misturador
5. Alimentador de reciclado e posterior entrada de ligante
6. Correia transportadora
7. Silos quentes
8. Sala de controle
9. Sistema de controle e filtragem de gases e pó

As fontes de emissões associadas à produção de mistura asfáltica a quente têm seu ponto crítico nos secadores e misturadores, uma vez que para secar e aquecer os agregados e ligantes asfálticos em altas temperaturas requer o uso de combustíveis, muitas vezes fósseis.

A Figura 4 ilustra as fontes de emissões de uma usina volumétrica enquanto que a Figura 5 mostra para as gravimétricas. As emissões são dos seguintes tipos, canalizadas, fugitivas ou de material particulado (poeira).

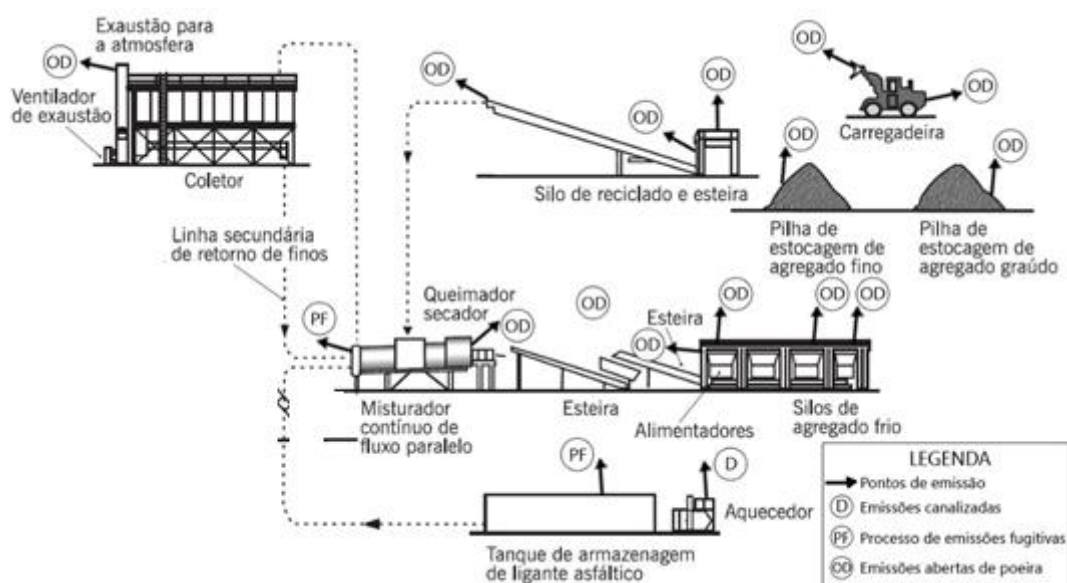


Figura 4. Fontes de emissões em uma usina volumétrica (Baseado em EPA, 2000).

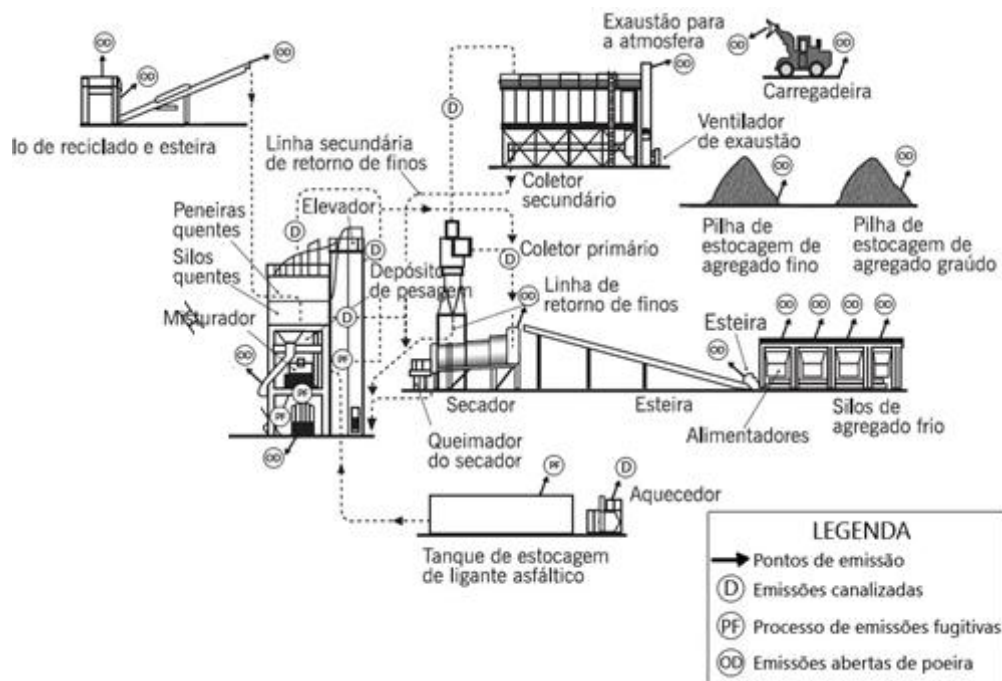


Figura 5. Fontes de emissões em uma usina gravimétrica (Baseado em EPA, 2000).

Os pontos de emissões de material particulado são identificados nos silos de armazenamento dos agregados e nas operações de carregamento de caminhões para transporte de misturas (NPI, 1999). Bernucci *et al.* 2008 destacam que embora a produção de misturas asfálticas não representam periculosidade aos seres humanos, são potenciais emissoras, em especial, de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, óxidos nitrosos (NO_x) e alguns metais.

López *et al.* (2016) consideram que a indústria associada à construção e manutenção de rodovias pavimentadas tem enfrentado diversos desafios para minimizar o consumo de energia e emissões. Destaca-se o uso de técnicas de produção de mistura de asfálticas empregando temperaturas mais baixas, as misturas mornas; otimização de métodos de projeto estrutural, melhoria das metodologias e técnicas de construção e sistema para gestão de manutenção de pavimentos.

Alguns autores asseveram que o uso crescente de recursos energéticos, bem como os índices associados às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) pode ser utilizado como um parâmetro indicativo na quantificação e escolha de um método mais sustentável e menos poluente (DOVI *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2009; MILLET *et al.*, 2010).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA, 2000) avaliou as principais emissões em usinas de asfalto a quente como sendo:

- Emissões de material particulado que incluem PM-10 e PM-2,5;
- Metais poluentes do ar como os Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAP);
- Compostos orgânicos;
- Dióxido de enxofre (SO_2)
- Óxidos de nitrogênio (NO_x);
- Monóxido de carbono (CO);
- Dióxido de carbono (CO_2);
- Compostos orgânicos voláteis (VOC).

Os Óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2) o dióxido de carbono (CO_2) e demais produtos de combustão estão diretamente ligados à forma de aquecimento das constituintes da mistura e do teor de umidade presente no agregado (NPI, 1999).

Para dimensão e o teor de poluentes busca-se a quantificá-los e classificá-los conforme sua natureza e formação. Desta forma é indispensável o estabelecimento de um inventário de

emissões no qual devem ser levantadas com exatidão as informações necessárias para auxílio na tomadas de decisões (FGV, 2008).

A Tabela 1 apresenta os principais gases do efeito estufa em relação ao seu potencial de aquecimento global e fontes emissoras.

Tabela 1. Características dos gases do efeito estufa (Baseado em Brasil, 2018).

Gás	Fonte emissora	PAG ⁽¹⁾	Descrição
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Combustão de combustíveis fósseis e mudança de uso do solo.	1	Utilizado como referência de classificação do PAG ⁽¹⁾ dos gases de efeito estufa.
Metano (CH ₄)	Produzido pela decomposição da matéria orgânica.	21	Encontrado em aterros sanitários, lixões, hidroelétricas, criação de gado e cultivo de arroz.
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Tratamento de dejetos de animais, queima de combustíveis fósseis, uso de fertilizantes e processos industriais.	310	Permanece em média 100 anos na atmosfera.
Gases Fluorados	Emitido a partir de processos industriais.	Alto valor de contribuição	⁽²⁾ SF ₆ , HFCs e PFCs

PAG⁽¹⁾ – Potencial de Aquecimento Global; ⁽²⁾ Hexafluoreto de enxofre (SF₆) = 23.900, Hidrofluorcarbonos (HFCs) = varia de 140 a 11.700 e Perfluorcarbonos (PFCs) = varia de 6.500 a 9.200

O potencial de aquecimento global dos gases do efeito estufa listados na Tabela 1 é uma maneira sistemática de quantificação do poder emissivo de cada um, em relação ao dióxido de carbono. Para mensurar o poder emissivo de cada poluente, tem-se utilizado o parâmetro dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), que representa a quantidade de energia que uma tonelada de gás absorverá durante um período de tempo, normalmente 100 anos, em relação a uma tonelada de CO₂. Quanto maior o potencial, maior o seu poder de aquecimento do planeta quando comparado ao CO₂. Este parâmetro é muito usado para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global dos diferentes gases, comparando seus impactos no meio ambiente (EPA, 2000).

As usinas de asfalto apresentam duas principais categorias de emissões, sendo elas fontes pontuais ou fugitivas. As de fontes pontuais são aquelas nas quais a emissão ocorre através de um duto ou espaço confinado e as de fontes fugitivas são aquelas nas quais ocorre a emissão direta ao ambiente. A maior fonte de emissões pontuais em usinas ocorre no tambor secador, sendo que as emissões consistem em vapor de água, material particulado e produtos de combustão (CO₂, NO_x, CO, CH₄, compostos orgânicos voláteis). Usinas de contrafluxo podem resultar em menor emissão de compostos orgânicos quando comparadas às usinas de fluxo paralelo, pois a mistura do agregado, ligante asfáltico e material reciclado (RAP) ocorre em uma zona que não está em contato com o ar quente (EPA, 2015).

Peinado et al. (2011) destacam que o teor de umidade dos agregados está diretamente relacionado ao desempenho em termos de capacidade de produção de uma usina de asfalto. Quanto mais elevado o teor de umidade, maior o tempo de secagem e aquecimento e, conseqüentemente, o tempo de produção e as emissões são elevadas. Nesse caso, os autores recomendam a proteção com a cobertura das pilhas de agregados. Xu e Lin (2019) avaliaram o impacto da utilização de gás natural na redução de emissões de CO₂ e observaram que o uso desse combustível proporcionou a redução das emissões quando comparado a outros combustíveis fósseis.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Esta pesquisa está estruturada para realizar a identificação e avaliação da medição de gases do efeito estufa, bem como os tipos de poluentes emissivos em usinas de asfalto.

Após a revisão de literatura, foram selecionados equipamentos para medição dos principais gases do efeito estufa. Os materiais utilizados se basearam nas literaturas consultadas e na ferramenta de cálculo, *GHG Protocol* (FGV, 2008). Inicialmente as medições seriam realizadas in loco, porém, devido à pandemia de COVID-19, foi necessária a realização de simulações. A Figura 6 ilustra o fluxograma do método.

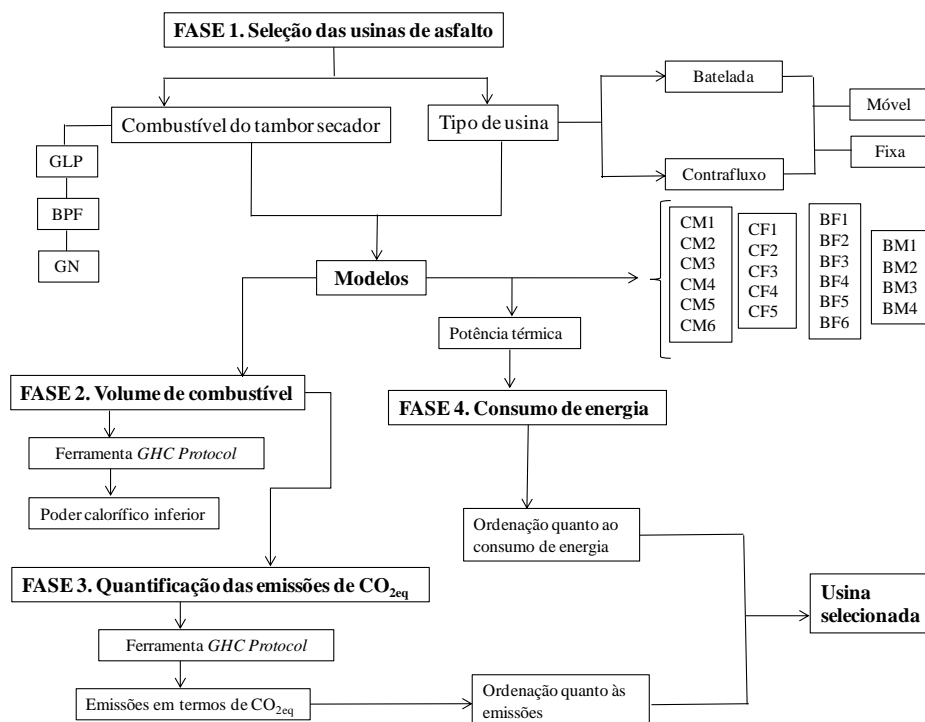


Figura 6. Fluxograma do método.

O método adotado consiste nas seguintes quatro fases:

1ª Fase – Seleção das usinas: foram selecionados dois tipos de usinas, por batelada (gravimétrica) e volumétrica de contrafluxo. Por meio de consulta às empresas fabricantes e em função da capacidade de produção de cada usina, obteve-se a potência térmica necessária ao tambor secador. Para cada configuração de usina, considerou-se o uso dos seguintes combustíveis no tambor secador: óleo baixo ponto de fluidez, gás liquefeito do petróleo e gás natural. Assim, a combinação de tipos de usina e de combustíveis utilizados resultou em vinte e um modelos, cujas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das usinas.

Modelo	Tipo de usina	Disposição	Capacidade (t/h)	Potência térmica (kcal/h)	Referência
CM1	Volumétrica Contrafluxo	Móvel	80	8.000.000,00	Marini (2020)
CM2			100	9.975.600,00	Ciber (2020)
CM3			120	10.000.000,00	Marini (2020)
CM4			140	12.000.000,00	Marini (2020)
CM5			160	12.425.000,00	Marini (2020)
CM6			200	11.435.580,00	Marini (2020)
CF1		Fixa	50	6.276.870,25	Marini (2020)
CF2			160	11.180.000,00	Marini (2020)
CF3			240	13.757.523,84	Ammann (2020)
CF4			300	17.196.904,80	Ammann (2020)
CF5			340	20.636.285,76	Ammann (2020)
BF1	Batelada Contínua	Fixa	100	10.232.158,36	Benninghoven (2020)
BF2			160	10.232.158,36	Benninghoven (2020)
BF3			210	12.037.833,36	Ammann (2020)
BF4			240	16.337.059,56	Benninghoven (2020)
BF5			260	20.636.285,76	Ammann (2020)
BF6			320	22.355.976,24	Ammann (2020)
BM1		Móvel	90	5.588.994,06	Ammann (2020)
BM2			140	7.996.560,73	Ammann (2020)
BM3			223	13.757.523,84	Ammann (2020)
BM4			278	17.196.904,80	Ammann (2020)

CM – Contrafluxo Móvel; CF – Contrafluxo Fixa; BF – Batelada Fixa e BM – Batelada Móvel.

2ª Fase – Volume de combustível para cada modelo: nessa fase foi feita a quantificação do volume de combustível necessário para atender a potência térmica de cada modelo de tambor secador das usinas. O cálculo de volume de cada combustível foi realizado por meio dos dados de poder calorífico inferior constantes na ferramenta *GHC protocol* (FGV, 2008), (Tabela 3).

3ª Fase – Quantificação das emissões de CO_{2eq}: a ferramenta *GHC protocol* (FGV, 2008) permite, através do cálculo da combustão estacionária, a determinação das emissões dos gases do efeito estufa (Tabela 3) e transformação em termos de CO_{2eq}. Para cada modelo de usina de asfalto, foi avaliada a emissão de CO_{2eq} por tonelada de mistura produzida. Dessa forma, foi possível ordenar as emissões por modelo e selecionar o modelo menos emissivo.

Tabela 3. Parâmetros de cálculo baseados na ferramenta *GHC Protocol* (FGV, 2008).

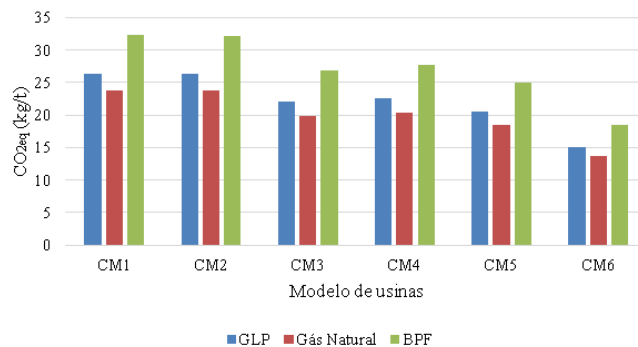
Combustível	Poder calorífico inferior (GJ/t)	Gases	Fatores de emissões (kg/un)
GLP (t)	46,5	CO ₂	2,931
		CH ₄	0,04647
		N ₂ O	0,004647
Gás natural (m ³)	49,8	CO ₂	2,1
		CH ₄	0,00004
		N ₂ O	0,000004
Óleo BPF (l)	40,2	CO ₂	3,1
		CH ₄	0,00012
		N ₂ O	0,000024

4ª Fase – Consumo de energia: foi realizado o levantamento da energia necessária para secagem e aquecimento por tonelada de agregado. A partir dos dados de potência térmica, estabelecidos na 1ª Fase, a energia necessária foi calculada através da divisão da potência térmica do tambor secador (kcal/h) pela capacidade de produção da usina (t/h). Dessa forma, foi possível determinar o modelo que obteve o menor e o maior consumo de energia para produção de uma tonelada de mistura asfáltica.

3. RESULTADOS

3.1. Emissões

A Figura 7 apresenta o comparativo de emissões em termos de CO_{2eq} das usinas contrafluxo móveis. Pode-se observar que, o combustível fóssil BPF (óleo de baixo ponto de fluidez) foi o mais emissivo, seguido pelo GLP (gás liquefeito do petróleo) e GN (gás natural). Relativamente à ordenação, pode-se afirmar que o modelo CM6 (maior capacidade) e o uso de combustível gás natural obtiveram emissões inferiores em relação aos demais para cada tonelada. Em média, para todos os modelos, com o uso do combustível gás natural (GN) houve redução das emissões de CO_{2eq} de 9,59% em relação ao GLP e 26,09% em relação ao BPF.

**Figura 7.** Emissões de CO_{2eq} nas usinas tipo contrafluxo móvel (CM).

Com o uso do gás natural, o modelo menos emissivo (CM6) emite 42,80% menos $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por tonelada, quando comparado ao modelo com maior emissão (CM1).

As emissões em termos de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para os modelos tipo contrafluxo fixa (Figura 8) mostraram que o combustível BPF foi o mais emissor, assim como nas usinas de contrafluxo móveis. Além disso, os modelos CF3 e CF4, quando utilizado gás natural, apresentaram as menores emissões em relação aos demais. Ainda, o modelo CF1 (menor capacidade) apresentou as maiores emissões por tonelada processada. Utilizando gás natural, os modelos menos emissivos (CF3 e CF4) emitem 54,35% menos $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por tonelada, quando comparado ao modelo de maior emissão (CF1).

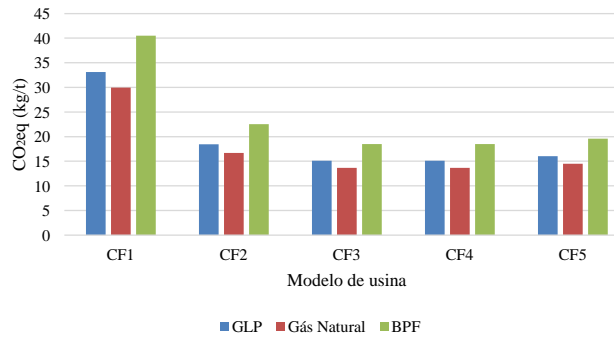


Figura 8. Emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ em usinas tipo contrafluxo fixa (CF).

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para os modelos tipo batelada fixos. É possível observar que o pior desempenho ambiental está associado ao óleo BPF, já que as maiores emissões estão associadas a esse combustível. Além disso, o modelo mais emissor foi o BF1. As emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ são reduzidas em 18,25% e 26,11%, quando queimado GLP e gás natural, respectivamente, ao invés de BPF. A combustão de gás natural em substituição ao GLP acarreta na redução média de 9,62% das emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Quando utilizado gás natural, o modelo menos emissivo (BF3) emite 38,09% menos $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por tonelada, quando comparado ao modelo de maior emissão (BF1).

Quanto aos modelos batelada móvel (Figura 10), as menores emissões foram observadas no modelo BM2 e as maiores emissões estão associadas ao modelo BM1. Quando foi utilizado gás natural, o modelo BM2 (menos emissivo) emite 8,03% menos $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por tonelada de agregado processada quando comparado ao modelo BM1 (mais emissivo).

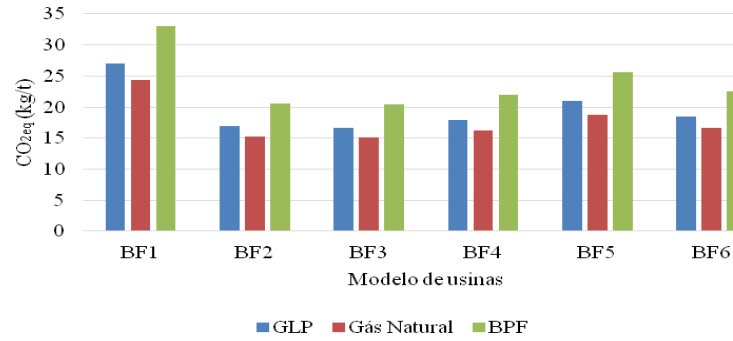


Figura 9. Emissões de CO_{2eq} em modelos de usina de asfalto batelada fixa (BF).

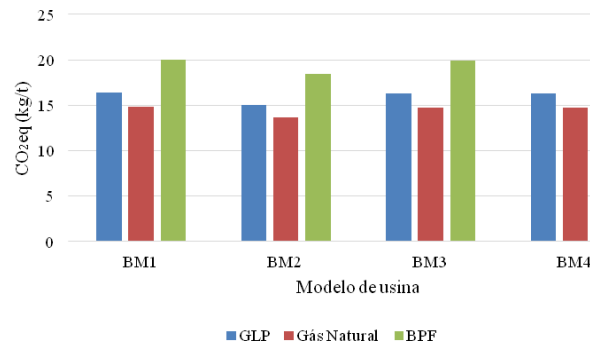


Figura 10. Emissões de CO_{2eq} em modelos tipo usina de asfalto batelada móvel (BM).

3.2. Consumo de energia

Os resultados apresentados são relativos ao consumo de energia necessária por tonelada de agregado processado no tambor secador. Foi verificado no catálogo dos fornecedores que o teor de umidade considerado para os agregados foi 3% em grande parte dos modelos analisados. Porém, nos modelos batelada fixa o teor variou de 4% a 5%.

A Figura 11 apresenta o consumo de energia das usinas tipo contrafluxo móvel, na qual se pode observar que o modelo CM6 (maior capacidade) requereu a menor demanda (57.178 kcal/t). Assim, para modelos, quanto maior a capacidade da usina, menor é o consumo de energia. O processamento do agregado no modelo de menor consumo, CM6 (57.178 kcal/t), requer 42,82% menos energia por tonelada, quando comparado ao modelo de maior consumo, CM1 (100.000 kcal/t). O resultado das usinas contrafluxo fixa na Figura 12 mostram que a menor demanda de energia para aquecimento e secagem do agregado foi observada nos modelos CF3 e CF4 (57.323 kcal/t) e a maior demanda no modelo CF1 (125.537 kcal/t). Dessa forma, o processamento do agregado no modelo CF4 requer 54,34% menos energia por tonelada processada quando comparado ao modelo CF1.

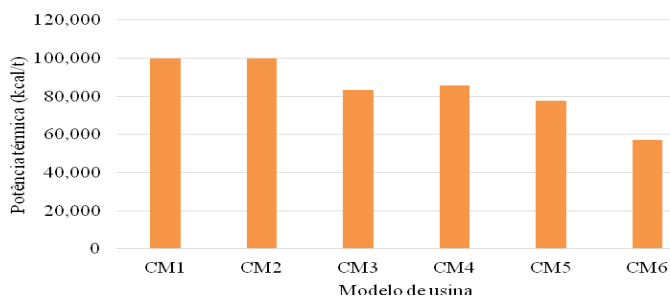


Figura 11. Consumo de energia nas usinas tipo contrafluxo móvel (CM).

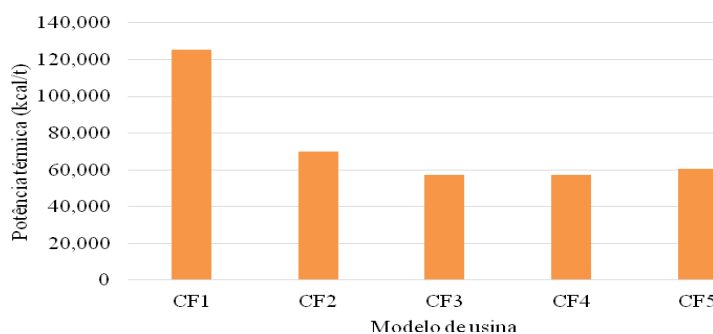


Figura 12. Consumo de energia nas usinas tipo contrafluxo fixa (CF).

A Figura 13 apresenta os resultados das usinas batelada fixas. Observou-se que a menor demanda ocorreu no modelo de usina BF3 (63.357 kcal). Em contrapartida, o modelo de usina BF1 (102.322 kcal/t) demandou mais energia para esse processo. Dessa forma, a utilização do modelo BF3 requer 38% menos energia por tonelada processada, quando comparado ao modelo BF1.

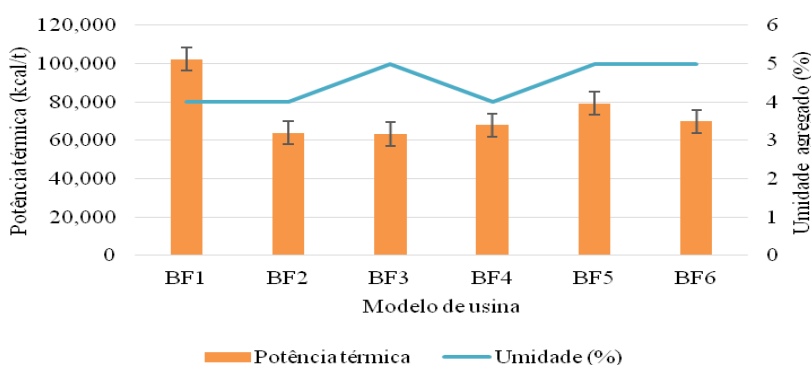


Figura 13. Consumo de energia em usinas tipo batelada fixa (BF).

Os resultados obtidos para as usinas tipo batelada móveis são apresentados na Figura 14. O menor consumo de energia está associado ao modelo BM2 (57.118,29 kcal/t) e, em

contrapartida, o maior consumo de energia ocorreu no modelo BM1 (62.099,93 kcal/t). Dessa forma, o processamento do agregado no modelo BM2 requer 8,02% menos energia quando comparado ao modelo BM1.

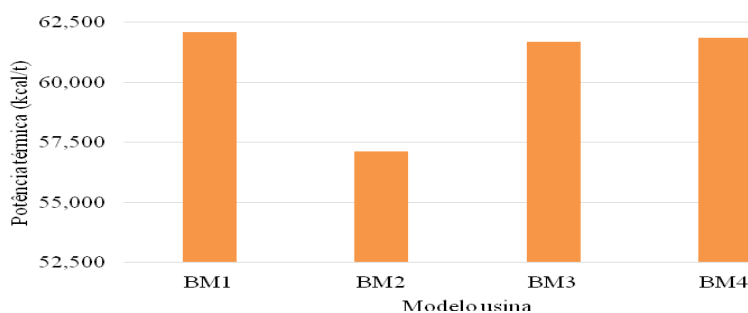


Figura 14. Consumo de energia em usinas tipo batelada móvel (BM).

3.3. Ordenação entre diferentes modelos de usina

Na Figura 15 são apresentadas as emissões médias para cada tipo de usina. Foi observado que em média o tipo contrafluxo móvel, utilizando óleo BPF, é mais emissivo. Em contrapartida, as usinas batelada móveis apresentam, em média, o melhor desempenho ambiental quando comparada às demais, quando utilizado gás natural. As usinas batelada móveis emitem 27,7% menos $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por tonelada de agregado processado quando comparado às usinas contrafluxo móveis.

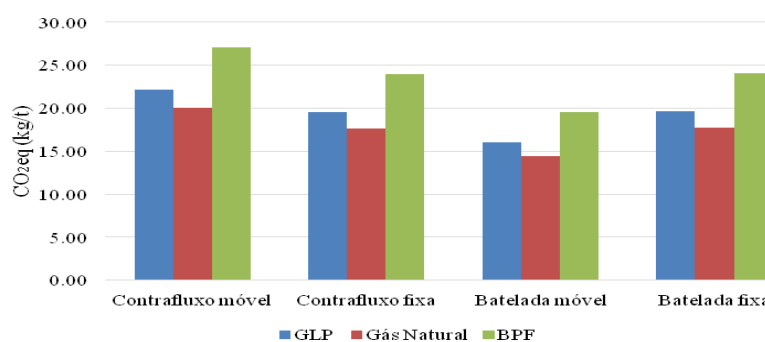


Figura 15. Comparativo de emissões entre todos os modelos analisados.

A Figura 16 mostra os consumos médios por tonelada de agregado processado em cada tipo de usina considerado neste estudo, a fim de analisar o tipo de usina que demanda menor quantidade de energia. Foi observado que as usinas tipo contrafluxo móvel requerem maior quantidade de energia por tonelada de agregado seco e aquecido. Em contrapartida, as usinas

batelada móveis, em média, demandam menos energia por tonelada de agregado processado. Foi constatado que, em média, os modelos tipo batelada móvel utilizam 27,7% menos energia por tonelada de agregado que os modelos contrafluxo móvel.

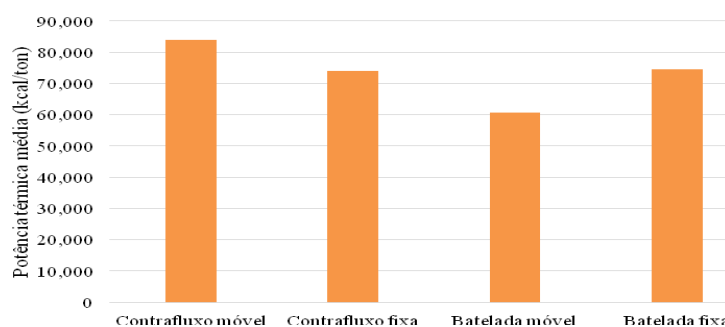


Figura 16. Comparativo de energia entre todos os modelos analisados.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de diferentes modelos de usinas asfálticas a partir das emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e consumo de energia por tonelada de agregado processado no tambor secador. Com base na ferramenta *GHC Protocol* (FGV, 2008), foram quantificadas as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de três diferentes combustíveis: gás natural, GLP e óleo BPF. Paralelamente, com o auxílio de uma planilha do Excel, foi calculado o consumo de energia por tonelada de agregado processado.

Foi constatado que a demanda de energia por tonelada processada pode variar significativamente entre os modelos, sendo que, nos modelos de usina tipo contrafluxo fixa houve redução de até 54,3% na demanda de energia entre eles. O modelo que demandou menos energia foi o BM2 (Batelada Móvel modelo 2), (57.118,29 kcal/t) e o maior consumo foi no modelo CF1 (Contrafluxo Fixa modelo 1), (125.537,41 kcal/t). A redução média de emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ utilizando gás natural e GLP foi, respectivamente, 26,11% e 18,25%, em comparação ao BPF. A utilização de gás natural reduz em 9,62% as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ quando comparado a utilização de GLP.

Além disso, foi constatado que usinas com maior capacidade de produção não necessariamente possuem menos impacto ambiental, porém as usinas que resultaram em menores emissões também consomem uma menor quantidade de energia, em todos os tipos de usina. Foi observado ainda que usinas com menor capacidade de produção resulte em maior emissão e maior consumo de energia, para todos os tipos de usina.

Entre os modelos avaliados, o uso do óleo BPF obteve pior desempenho, o qual está associado ao modelo CF1 (40,50 kg de CO_{2eq}/t). Os modelos que apresentaram as menores emissões quando utilizado gás natural foram: BM2 (13,62 kg de CO_{2eq}/t), CM6 (Contrafluxo Móvel modelo 6) (13,64 kg de CO_{2eq}/t), CF3 e CF4 (Contrafluxo Fixa modelos 3 e 4) (13,67 kg de CO_{2eq}/t). Dessa forma, a utilização do gás natural como fonte de energia para o aquecimento e secagem dos agregados, somada à utilização de modelos que apresentam menores emissões, pode proporcionar estruturas com melhor desempenho ambiental. Este estudo pode contribuir com os estudos de emissões em usinas de asfalto no Brasil.

5. AVALIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS BENEFÍCIOS DA IC NO APRENDIZADO E FORMAÇÃO CIENTÍFICA

Com a participação no Programa de Iniciação Científica (PIBIC) nos 12 meses de bolsa, foi possível compreender que a importância das medições e controle de emissões na produção de misturas asfálticas em usinas de asfalto ultrapassam os limites da infraestrutura viária, enquanto o consumo de recursos e a falta de controle no processo produtivo contribuem para emissões de GEE. Ainda que o principal material usado na pavimentação seja misturas de asfalto a quente, o controle, medição e criação de inventário de medições de GEE são essenciais para tomadas de decisões.

A realização desta pesquisa também possibilitou a reflexão sobre os métodos utilizados para a obtenção dos resultados. A bibliografia nacional disponível nem sempre revela os aspectos mais imperceptíveis e muitas vezes mais importantes do objeto de estudo. Contudo as bibliografias internacionais serviram de complemento para entendimento e reflexão dos pontos chaves para início das medições.

A pesquisa também contribuirá significativamente na maior compreensão e embasamento a cerca de uma pesquisa científica, o que complementa o ensino da graduação, pois não é visto e passado de forma direta ao longo da formação acadêmica do bolsista. Esta iniciação científica também refletirá também na vida profissional, após conclusão da graduação.

Todas as etapas previstas foram concluídas, com grande destaque para pesquisa bibliográfica e a busca por ferramentas disponíveis de forma gratuita no ambiente acadêmico/profissional foram de extrema importância, pois se certifica que há muito material de qualidade disponível para avaliar problemas, sejam no setor da engenharia civil como enfoque desta pesquisa ou mesmo outras áreas.

Ao término deste período de pesquisa, gostaria de agradecer ao CNPq a oportunidade a que foi me dado para realização das pesquisas e inserção no setor de infraestrutura viária, que me permitiram o conhecimento e experimentar novas ferramentas para construção de conhecimento científico e me possibilitaram aprender e criar um pensamento mais crítico para meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Quero agradecer também ao apoio e ensinamentos dados pela orientadora Prof^a. Dra. Liseane Padinha Thives, com certeza seu apoio foi essencial para completo entendimento e clareza da pesquisa.

6. ARTIGOS A SEREM PUBLICADOS DERIVADOS DA PESQUISA E DA INICIAÇÃO CIENTÍFICA

1. Artigo aceite na *The International Conference on Solid Waste Technology and Management* que seria realizada em março de 2020. No entanto, a conferência foi suspensa devido à pandemia da COVID-19. O artigo será publicado na *The 36th International Conference on Solid Waste Technology and Management* que será realizado de 14 a 17 de março de 2021 em Annapolis nos Estados Unidos da América.

Título do artigo: Assessment of greenhouse gas emissions in asphalt plant.

2. Artigo aceite no Congresso Internacional de Engenharia Ambiental & 10^a Reunião de Estudos Ambientais, que devido à pandemia, o evento será virtual entre os dias 26, 27 e 28 de outubro de 2020, em Porto Alegre/RS.

Título do artigo: Emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia em usinas de asfalto.

3. O artigo “Emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia em usinas de asfalto” foi selecionado para publicação em edição especial na Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, classificação Qualis A4.

Título do artigo: *Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants.*

REFERÊNCIAS

- Ammann; 2020. Usinas de Asfalto. Disponível em: <https://www.ammann.com/pt-br/plants/asphalt-plants>
- Benninghoven; 2020. Produtos Benninghoven. Disponível em: <https://www.wirtgen-group.com/ocs/pt-tl/benninghoven/produtos-benninghoven-96-c/>
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B., 2008. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. ABEDA, 3ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Brasil, 2000. Efeito Estufa e Aquecimento Global. Ministério do Meio Ambiente Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>
- Ciber; 2020. Usinas de asfalto móveis contínuas. Disponível em: <https://www.wirtgen-group.com/ocs/pt-br/ciber/usinas-de-asfalto-moveis-continuas-107-c/>
- De Aquino, A.R.; Paletta, F.C.; Silva, A.C.M.; Dalvão, A.S.; Bordo, I.C.A.; Ribeiro, L.S.S.; Stecher, L.; Oliveira, M.J.A.; Silva, V.; Santos, R.M.; Mattiolo, S.R.; Scagliusi, S.R.; Garcia, V.S.G.; Almeida, J.R., 2015. Sustentabilidade ambiental,, 1 ed. Rede Sirius, OUERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. ISBN 978-85-88769-89-2 (E-book).
- Dovi, V.G. et al., 2009. Cleaner energy for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 17 (10), 889-895.
- EPA, 2000. Hot mix asphalt plants, emission assessment report, Environmental protection, planning and standards, Office of air quality, EPA-454/R-00-019, North Carolina, USA.
- EPA, 2015. Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks. United States Environmental Protection Agency, USA.
- FGV, 2008. Programa brasileiro GHC Protocol, 2008. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <https://www.ghgprotocolbrasil.com.br/>
- Huang, Y. et al., 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17 (2), 283-296.
- IPCC, 2014. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- López, L.A.; Arce, G.; Morenate, M.; Monsalve, F., 2016. Assessing the inequality of Spanish households through the carbon footprint: The 21st Century great recession effect. *Journal of Industrial Ecology*, 20, 571–581.
- Marini, 2020. Produtos. Disponível em: <http://marinilatinamerica.com.br/products/>
- Millet, D. et al., 2010. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production*, 15 (4), 335-346.
- NPI, 1999. Emission estimation technique manual for hot mix asphalt manufacturing. National Pollutant Inventory (NPI). Environment Australia. Disponível em: <http://www.npi.gov.au/resource/emission-estimation-technique-manual-hot-mix-asphalt-manufacturing>
- Peinado D.; Vega, M.; García-Hernando, N.; Marugán-Cruz, C., 2011. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. *Applied Thermal Engineering*, 31(6–7):1039–1049.
- Rubio, M.D.C.; Moreno, F.; Martínez-Echevarría, M.J.; Martínez, G.; Vázquez, J.M.; 2013. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 1–6.
- Silva, C.N.; Moura, F.C.C.; Lago, R.M.; Xavier, E.S., 2006. A discussão do efeito estufa nos livros de Química do Ensino Médio e Superior. 13º Encontro nacional de Química (ENEQ). Unicamp, Campinas, SP, Brasil.
- Silva, C.L. e Mendes, J.T.G., 2005. Reflexões sobre o desenvolvimento sustentável- Agentes e interações sob a ótica multidisciplinares. Editora Vozes, Petrópolis, RJ, Brasil. ISBN-10: 8532632351
- Xu, B. e Lin, B., 2019. Can expanding natural gas consumption reduce China's CO2 emissions?. *Energy Economics*, 81:393–407.