

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Jair Frederico Santoro

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS AMBIENTAIS
PARA O DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

Passo Fundo, RS
2015

Jair Frederico Santoro

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA O
DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE ESTRUTURAS EM
CONCRETO ARMADO

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo, RS
2015

Jair Frederico Santoro

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA O
DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE ESTRUTURAS EM
CONCRETO ARMADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de Aprovação: Passo Fundo, 24 de abril de 2015.

Doutor Moacir Kripka
Orientador

Doutor Gray Farias Moita
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Doutora Vera Maria Cartana Fernandes
Universidade de Passo Fundo – UPF

Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo, RS
2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a minha família; esposa, Joice, e filhas, Vitória e Luiza, pelo incentivo e apoio para concluir mais uma etapa de formação acadêmica da minha vida.

Agradeço ao professor Moacir, em aceitar ser o orientador deste trabalho e por todo auxílio prestado em todas as etapas de desenvolvimento do mesmo.

Agradeço à engenheira Pauline e ao engenheiro Tarso, pelo auxílio nos levantamentos de campo, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores membros da banca examinadora deste trabalho, por todas as contribuições efetuadas.

E a todos que acima não foram referidos, mas que, de alguma forma, contribuíram para a viabilização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

O concreto armado é, atualmente, no Brasil, um dos materiais mais usados na construção de estruturas de edificações e grandes obras viárias como pontes, viadutos, passarelas, entre outras. Seu uso difundido advém da grande facilidade de execução e adaptação às mais diversas formas. Reduzir o consumo dos materiais envolvidos na produção do concreto armado, reduzindo, conseqüentemente, também o seu custo, é uma das maneiras de buscar uma maior sustentabilidade da construção civil. Estas reduções de consumo de materiais e custos, se avaliadas, levando-se em conta também os impactos que a produção dos mesmos gera no meio ambiente, podem vir a aprimorar ou redirecionar as conclusões ou decisões a serem tomadas em relação à busca de uma maior sustentabilidade ambiental. Dentro deste enfoque, elabora-se o presente estudo, que objetiva quantificar e avaliar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e o consumo de energia elétrica, impactos ambientais gerados quando da extração e produção dos materiais (aglomerante, agregados graúdos, agregados miúdos e aço) utilizados na região norte do estado do Rio Grande do Sul, na produção do concreto armado. Juntamente, são avaliados os mesmos impactos ambientais gerados no transporte destes materiais até o local de sua utilização a central dosadora de concreto, e na produção e transporte do concreto até a obra. Em um segundo momento buscou-se otimizar a utilização destes materiais através do dimensionamento de vigas de concreto armado, levando-se em conta não somente a redução do custo quando da sua utilização, mas também a redução dos impactos ambientais de sua geração e transporte. Os resultados obtidos indicam que em relação aos transportes das matérias primas, os mesmos são significativos nos resultados finais das emissões de CO₂. Já na escolha da resistência do concreto, a utilização de resistência menor apresenta um comportamento melhor nas reduções das emissões de CO₂, nos consumos de energia elétrica e nos custos, mesmo que quando com resistência maior exista a diminuição do volume de materiais utilizados.

Palavras-chave: Concreto Armado, Emissão de CO₂, Consumo de Energia Elétrica, Otimização.

ABSTRACT

In Brazil, reinforced concrete is currently one of the most used materials in the construction of building structures and big road infrastructures such as bridges, viaducts, pedestrian bridges and so on. Its widespread use results from the great execution ease and adaptation to many forms. One of the ways to search greater sustainability in construction industry is to reduce consumption of materials involved in the production of reinforced concrete, consequently reducing its cost. These reductions in materials consumption and costs, if evaluated under the impact their production generates in the environment, can come to enhance or redirect conclusions or decisions to be taken concerning the search for a higher environmental sustainability. Under this focus, the present study is elaborated. The objective is to quantify and evaluate the emission of carbon dioxide (CO₂) and the electric energy consumption, and also the environmental impacts generated when extracting and producing materials (agglomerant, coarse aggregates, crushed aggregates, and steel) used in the north of the state of Rio Grande do Sul, in the production of reinforced concrete. The environmental impacts generated in the transportation of these materials to the place of their utilization are also evaluated, i.e., from the concrete batcher and the transportation to the building site. In a second phase, the use of these materials through the dimensioning of reinforced concrete beams was optimized, taking into account not only cost reduction but also the reduction of environmental impacts in its generation and transportation. The obtained results indicate meaningful final results in the emission of CO₂ related to transportation. Yet, in the choice of concrete resistance, the use of smaller resistance presents a better result in relation to reduction of CO₂ emission, electric energy consumption, and in costs, even if with a bigger resistance there is a decrease in the volume of the used materials.

Key words: Reinforced Concrete, CO₂ Emission, Electric Energy Consumption, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágios do ciclo de vida.....	15
Figura 2: Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	16
Figura 3: Fases do ciclo de vida das edificações	18
Figura 4: Localização geográfica das matérias primas.....	28
Figura 5: Regiões de levantamento de dados	29
Figura 6: Perfuração do topo da jazida.....	30
Figura 7: Carregamento das rochas de basalto	31
Figura 8: Descarregamento das rochas de basalto no britador primário	31
Figura 9: Desagregação das rochas no britador primário	32
Figura 10: Britadores, peneiras classificatórias, correias e armazenamento dos agregados ...	33
Figura 11: Carregamento dos agregados.	33
Figura 12: Dragagem da jazida.....	36
Figura 13: Armazenamento para secagem.....	36
Figura 14: Carregamento da matéria prima.....	37
Figura 15: Armazenamento final.....	37
Figura 16: Caminhão de transporte de aglomerante (cimento) a granel.....	41
Figura 17: Baias de armazenamento das matérias primas	45
Figura 18: Descarregamento do aglomerante no silo da central dosadora	45
Figura 19: Carregamento das matérias primas no caminhão betoneira.....	46
Figura 20: Caminhão betoneira para deslocamento do concreto até a obra	47
Figura 21: Viga bi-apoiada utilizada nos dimensionamentos.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo unitário de energia na produção de cimento no Brasil (1970-2007).....	20
Gráfico 2: Produção de cimento e emissões de CO ₂ no Brasil.....	40
Gráfico 3: Consumo de energia elétrica por tonelada de cimento.....	41
Gráfico 4: Emissões de CO ₂ da extração/produção e transporte.....	50
Gráfico 5: Porcentagens de emissões de CO ₂ da extração/produção e transporte.....	51
Gráfico 6: Consumo de energia elétrica da extração/produção.....	52
Gráfico 7: Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 20 MPa.....	53
Gráfico 8: Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 40 MPa.....	54
Gráfico 9: Contribuições nas emissões de CO ₂ por metro cúbico de concreto.....	54
Gráfico 10: Totais de emissões de CO ₂ para cada resistência por metro cúbico.....	55
Gráfico 11: Contribuições das matérias primas nas emissões de CO ₂ por metro cúbico.....	55
Gráfico 12: Emissões de CO ₂ por metro cúbico de concreto sem grandes deslocamentos.....	56
Gráfico 13: Comparações das emissões totais de CO ₂ por metro cúbico de concreto.....	57
Gráfico 14: Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 20 MPa.....	58
Gráfico 15: Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 40 MPa.....	59
Gráfico 16: Contribuições das matérias primas no consumo de energia por metro cúbico.....	59
Gráfico 17: Consumo de energia elétrica de cada resistência por metro cúbico de concreto.....	60
Gráfico 18: Contribuições de emissões de CO ₂ nos processos da central dosadora.....	61
Gráfico 19: Contribuições nas emissões totais de CO ₂ por metro cúbico de concreto.....	61
Gráfico 20: Contribuições nos consumos totais de energia por metro cúbico de concreto.....	62
Gráfico 21: Comparativo de custos no dimensionamento otimizado das vigas.....	66
Gráfico 22: Comparativo de emissões de CO ₂ no dimensionamento otimizado das vigas.....	68
Gráfico 23: Comparativo de consumo de energia no dimensionamento otimizado das vigas.....	70
Gráfico 24: Concreto 20 MPa, porcentagem melhor na utilização em relação ao de 40 MPa.....	70
Gráfico 25: Porcentagens de influência do aço para o concreto com resistência de 20 MPa.....	71
Gráfico 26: Porcentagens de influência do aço para o concreto com resistência de 40 MPa.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Emissões atmosféricas totais nas etapas de ciclo de vida da areia	21
Tabela 2: Cálculo da emissão de CO ₂ e consumo de energia elétrica das matérias primas. ...	34
Tabela 3: Cálculo da emissão de CO ₂ do transporte das matérias primas.....	35
Tabela 4: Cálculo da emissão de CO ₂ e consumo de energia elétrica das matérias primas. ...	38
Tabela 5: Cálculo da emissão de CO ₂ do transporte das matérias primas.....	38
Tabela 6: Cálculo da emissão de CO ₂ do transporte das matérias primas.....	42
Tabela 7: Cálculo da emissão de CO ₂ do transporte das matérias primas.....	44
Tabela 8: Produção e consumo de energia elétrica e diesel por metro cúbico de concreto.....	48
Tabela 9: Cálculo da emissão de CO ₂ e consumo de energia por metro cúbico de concreto..	48
Tabela 10: Cálculo da emissão de CO ₂ e consumo de energia elétrica das matérias primas. .	49
Tabela 11: Cálculo da emissão de CO ₂ dos transportes das matérias primas.....	49
Tabela 12: Emissões de CO ₂ da extração/produção e transporte	50
Tabela 13: Consumo de energia elétrica da extração/produção	51
Tabela 14: Emissões de CO ₂ por metro cúbico para o concreto com traço de 20 MPa.	52
Tabela 15: Emissões de CO ₂ por metro cúbico para o concreto com traço de 40 MPa.	53
Tabela 16: Consumo de energia elétrica por metro cúbico, concreto com traço de 20 MPa ..	57
Tabela 17: Consumo de energia elétrica por metro cúbico, concreto com traço de 40 MPa. .	58
Tabela 18: Emissões de CO ₂ nos processos da central dosadora de concreto.....	60
Tabela 19: Custos médios do concreto e aço na região de estudo.....	64
Tabela 20: Custos das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.....	65
Tabela 21: Custos das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.....	65
Tabela 22: Emissões de CO ₂ do concreto e aço na região em estudo.	66
Tabela 23: Emissões de CO ₂ das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.....	67
Tabela 24: Emissões de CO ₂ das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.....	67
Tabela 25: Consumo de energia elétrica do concreto e aço na região de estudo.	68
Tabela 26: Consumo de energia elétrica das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.	69
Tabela 27: Consumo de energia elétrica das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	15
2.2 Impactos ambientais gerados pela extração, produção e transporte das matérias primas utilizadas na produção do concreto armado.....	18
2.2.1 Aglomerantes (cimento).....	19
2.2.2 Agregado miúdo (areia natural e areia de britagem).....	20
2.2.3 Agregado graúdo (brita).....	22
2.2.4 Aço	22
2.3 Otimização de estruturas de concreto armado visando à minimização do impacto ambiental.....	23
3 LEVANTAMENTOS DAS EMISSÕES DE CO ₂ E DOS CONSUMOS DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO E TRANSPORTE DAS MATÉRIAS PRIMAS E NA PRODUÇÃO E TRANSPORTE DO CONCRETO ATÉ A OBRA.....	27
3.1 Emissões de CO ₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do agregado graúdo (brita) e miúdo (areia de britagem).....	29
3.2 Emissões de CO ₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do agregado miúdo (areia natural).....	35
3.3 Emissões de CO ₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do aglomerante (cimento).....	39
3.4 Emissões de CO ₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do aço... ..	42
3.5 Emissões de CO ₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do concreto.. ..	44
4 ANÁLISE DOS DADOS LEVANTADOS COM AVALIAÇÕES E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS	50
4.1 Emissões de CO ₂ das matérias primas.....	50
4.2 Consumos de energia elétrica das matérias primas	51

4.3 Emissões de CO ₂ das matérias primas utilizadas na produção de um metro cúbico de concreto	52
4.4 Consumos de energia elétrica das matérias primas utilizadas na produção de um metro cúbico de concreto.....	57
4.5 Emissões de CO ₂ nos processos de produção e transporte de um metro cúbico de concreto pela central dosadora	60
4.6 Consumos de energia elétrica no processo de produção de um metro cúbico de concreto	62
5 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS BI-APOIADAS, OTIMIZANDO O USO DAS MATÉRIAS PRIMAS, LEVANDO-SE EM CONTA O ENFOQUE ECONÔMICO E O ENFOQUE AMBIENTAL SEPARADAMENTE	63
5.1 Características das vigas bi-apoiadas utilizadas nos dimensionamentos	63
5.2 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta os custos.....	64
5.3 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta emissões de CO ₂ .	66
5.4 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta os consumos de energia elétrica.....	68
5.5 Avaliações dos resultados obtidos.....	70
6.0 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.	72
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A preocupação de toda a sociedade com a crescente redução dos recursos naturais e com a degradação progressiva do meio ambiente vem se ampliando nos últimos anos. Esta consciência ecológica em franco crescimento, seja espontaneamente ou por força da legislação, tem feito com que surjam novas técnicas de análise que buscam auxiliar a construção de novos modelos de avaliação ambientalmente mais sustentáveis.

Segundo John (2007), os impactos ambientais do fluxo de materiais na produção do ambiente construído são evidentes. A construção de edificações consome até 75% dos recursos extraídos da natureza, com o agravante que a maior parte destes recursos não é renovável. A produção, transporte e uso dos materiais contribuem para a poluição global e as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes do ambiente interno de edificações são igualmente relevantes.

Oliveira (2007) relata que a indústria da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia e um grande gerador de resíduos. O desenvolvimento de produtos, processos e serviços menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana é um desafio para as nações que buscam o desenvolvimento sustentável e encontram na indústria da construção civil um suporte para as mudanças necessárias.

A questão dos materiais deve estar presente nas discussões referente à arquitetura sustentável, podendo-se afirmar que a sustentabilidade de uma construção começa no entendimento do contexto no qual a edificação será inserida e no detalhamento do projeto combinado com a seleção correta de materiais e componentes (CARNEIRO et al. 2009).

A evolução dos consumos de cimento e concreto no país tem ocorrido de forma irregular, com períodos de decréscimo, como verificado na década de 1980. Apesar disso, estes indicadores têm apresentado crescimento significativo, com a produção de cimento em 2007 representando cinco vezes a de 1970. Entretanto, as emissões unitárias no cimento foram reduzidas ao longo deste período, fazendo com que as curvas de produção e emissão fossem desacopladas. As taxas de redução das emissões diminuem gradativamente no país, enquanto a produção total de cimento e concreto crescem. Diante disto, é necessário estudar outras formas de redução das emissões, além das que estão sob controle do setor cimenteiro. Nas obras, o cimento é aplicado incorporado em concretos e argamassas, e fatores específicos nestas aplicações interferem diretamente no seu consumo e, conseqüentemente, nas suas emissões. A má aplicação destes compósitos pode reverter ganhos ambientais obtidos pela indústria cimenteira na forma de redução de emissões de gases do efeito estufa. Em situações

de alta participação de não especialistas na produção de argamassas e concretos, como a brasileira, esta questão torna-se ainda mais importante (LIMA, 2010).

Silva (2013) relata que diversas metodologias vêm sendo empregadas no estudo dos impactos ambientais das edificações, dentre elas a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, que consiste em um método que permite a realização de um estudo detalhado de todas as fases da edificação, sendo a fase de materiais, de construção, de uso e manutenção e de fim de vida.

Na avaliação do ciclo de vida de um produto da construção civil, cada fase terá uma quantidade de fluxos de recursos que são consumidos e resíduos que são dispostos de alguma forma no meio ambiente, reciclado ou utilizado em outra linha de produção. Na avaliação do ciclo de vida, é feita a quantificação destes fluxos, gerando grande quantidade de dados que, muitas vezes, acabam necessitando de ferramentas computacionais com bancos de dados (OLIVEIRA, 2007).

A utilização de ferramentas de avaliação que leve em consideração, de forma integrada os aspectos ambientais e econômicos para a seleção de materiais e componentes utilizados, torna-se um meio importante e imprescindível para a maior sustentabilidade na execução das construções.

Segundo Medeiros (2012), algumas pesquisas desenvolvidas recentemente têm apontado, também, em direção à otimização estrutural por meio da consideração de custos ambientais. Como exemplo de trabalhos que otimizam estruturas considerando os impactos ambientais das mesmas citou os trabalhos de Payá-Zaforteza et al. (2008), Payá-Zaforteza et al. (2009), Yeo e Gabbai (2011) e Yepes et al. (2012).

Para atender estas questões, foi proposta, através do presente estudo, a obtenção de parâmetros que possam ser utilizados na execução das estruturas otimizadas de concreto armado, levando-se em conta, além de questões econômicas, questões ambientais.

1.1 Justificativa

A produção dos materiais de construção é realizada em diferentes lugares do mundo. Tal fato evidencia a necessidade da criação de um perfil ambiental específico de cada um desses países, já que muitos deles não têm o perfil ambiental de seus produtos e, então, recorrem aos dados de outros países, como, por exemplo, o banco de dados europeu, com o objetivo de desenvolver estudos do tipo de avaliação do ciclo de vida. Ao mesmo tempo é necessário que métodos similares aos da ACV sejam aplicados para caracterizar o desempenho ambiental das edificações em diferentes regiões do mundo (SILVA, 2013).

Segundo Souza et al.(2011 apud KALBUSCH, 2011), a difusão de estudos envolvendo ACV na área acadêmica é evidente. Embora existam inúmeros estudos sobre os impactos ambientais de materiais e produtos, ainda existe muito a ser realizado no que tange à qualificação de impactos na área da construção civil. Limitações comuns em estudos de ACV são a idade dos dados ou a falta dos dados que reflitam a realidade local, o que implica a necessidade de utilização de dados disponíveis de outros locais ou mesmo a alteração das fronteiras do sistema considerado.

A aplicação de ferramentas de ACV, de forma a implementar um sistema buscando obtenção de dados “reais”, depende da existência de valores de referência para as condições particulares da construção na zona em estudo. Um estudo que obtenha todos os dados necessários para a implementação de valores de referência para a realidade nacional contribuiria largamente para a implementação e inovação do sistema no Brasil, uma vez que a dificuldade da obtenção dos dados ou a inexistência dos mesmos torna-se a maior dificuldade para a aplicação da ferramenta, levando a utilização de alguns valores do país de origem da ferramenta, conseqüentemente, podendo “distorcer” alguns resultados (LIBRELOTTO; JALALI, 2008).

Silva (2013), em seu estudo, demonstra que levantar dados relativos à emissão de CO₂ e consumo de energia do concreto é estar avaliando a maior representatividade em massa dos insumos de materiais utilizados na construção de uma edificação. Também indica que o concreto, em seu estudo, teve impacto direto no consumo de energia e emissão de CO₂, respectivamente, de 68% e 60% do total.

Obter esta base de dados para a realização deste estudo promoverá a utilização de dados mais condizentes com a realidade de nossa região, evitando erros pela utilização de dados de outros países ou até regiões do Brasil, possibilitando a otimização da quantificação dos materiais para a execução de concreto armado levando em conta o enfoque ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Obter parâmetros de emissão de dióxido de carbono (CO₂) e consumo de energia elétrica das fases de extração, produção e transporte das matérias primas utilizadas na produção do concreto armado e das fases de produção e transporte do concreto até a obra, que

possibilitem a otimização de estruturas levando em conta o enfoque ambiental na região norte do estado do Rio Grande do Sul.

1.2.2 Objetivos Específicos

Identificar e quantificar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e o consumo de energia elétrica durante as fases de extração e/ou produção e transporte das matérias primas utilizadas para a produção do concreto armado.

Identificar e quantificar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e o consumo de energia elétrica nas fases de produção na Central Dosadora de Concreto e no transporte do concreto até a utilização na obra.

Através de estudo de caso de vigas de concreto armado, utilizar a base de dados obtida e dimensionar as vigas de modo otimizado e conforme normatização em vigor, levando em conta questões econômicas e questões ambientais separadamente.

Apresentar diretrizes que possibilite a redução do impacto das estruturas de concreto no meio ambiente, considerando fatores como a resistência característica do concreto, o tipo de agregado e a distância do local de extração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

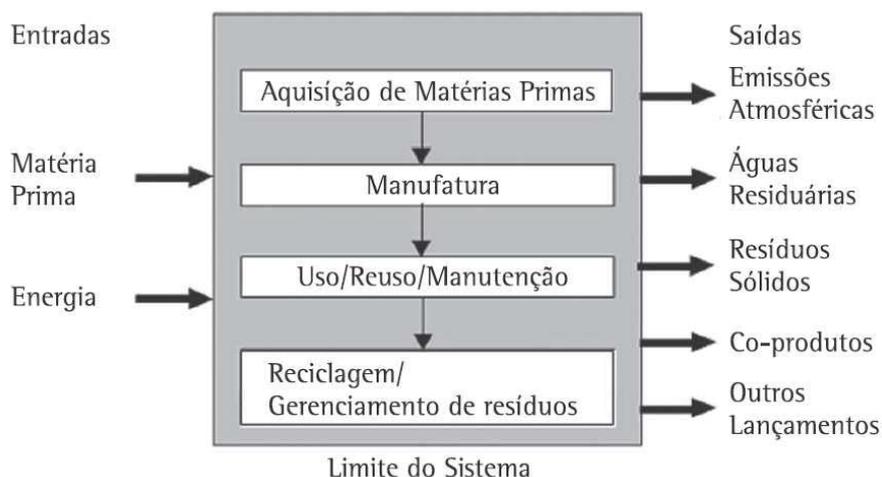
2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a ferramenta utilizada para analisar-se o impacto ambiental de produto e a tomada de decisões baseada na eco-eficiência. Essa ferramenta integra o conjunto de normas ISO 14000 – normas entre 14040 a 14049. A análise do ciclo de vida possui deficiências, mas é, certamente, a ferramenta adequada para a análise dos impactos ambientais associados a qualquer produto, inclusive materiais da construção civil (ISAIA, 2007).

Um dos trabalhos precursores que contemplaram as emissões de poluentes gerados por processos de produção realizado no início da década de 70 comparou a fabricação de garrafas de vidro, de polietileno e de policloreto de vinila (PVC), focando a atenção no desenvolvimento de um modelo de análise denominado: material-processo-produto (BARBIERI et al., 2009).

Segundo Willers et al. (2013), a ACV é padronizada pela International Organization for Standardization (ISO), que elaborou a ISO 14040 sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, publicada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. De acordo com a ISO 14040 (2009), a ACV é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (Figura 1).

Figura 1 – Estágios do ciclo de vida.



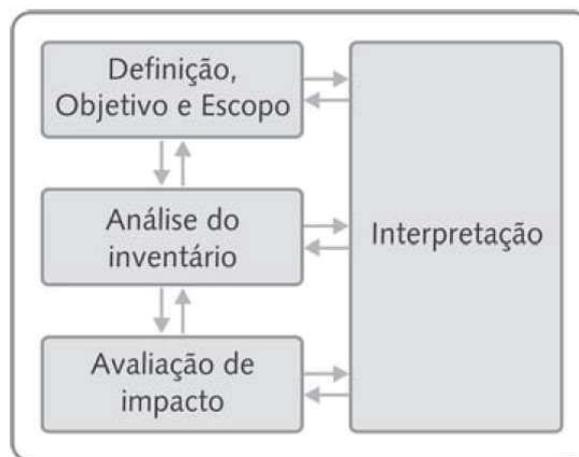
Fonte: Willers et al. (2013 apud EPA e SETAC, 2006).

Segundo Souza (2012), a ACV avalia os efeitos de um produto sobre o meio natural, possibilitando a análise e escolha de alternativas sob uma perspectiva ambiental, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias primas e energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado.

Cada uma dessas etapas do ciclo de vida causa impactos ambientais positivos ou negativos. Exemplos de impactos negativos como a fase de transporte que usa recursos naturais não renováveis (derivados de petróleo) e emite poluente (CO₂, SO_x, partículas respiráveis, etc.); o processamento industrial que requer energia e água, emite poluentes para o ar e para a água e gera resíduos. Exemplos de impactos positivos, o uso de um determinado produto pode fixar poluentes (como o CO₂ atmosférico fixado pelo concreto ao carbonatar-se); caso possa ser reciclado ao final de sua vida útil, o produto ajudará a preservar recursos naturais (ISAIA, 2007).

Segundo a ISO 14040, a metodologia de ACV é dividida em fases, sendo elas definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e interpretação de resultados (Figura 2).

Figura 2 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).



Fonte: adaptado da ABNT NBR ISO 14040 (2009).

A definição de objetivo e escopo deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente. Deve ser suficientemente bem definida para assegurar que a abrangência, a profundidade e o detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo declarado.

A análise de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Este consiste em um balanço de energia e massa que configura o inventário de ciclo de vida (ICV), cuja análise avalia os efeitos ambientais do sistema.

A avaliação de impactos é dirigida à avaliação da significância dos impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida. Em geral, esse processo envolve a associação de dados do inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender esses impactos. Questões como escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividades na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida.

E, por fim, a interpretação de resultados, fase em que as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto – ou, no caso de estudos de inventário do ciclo de vida (ICV), somente os resultados da análise de inventário – são combinadas, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando a alcançar conclusões e recomendações.

As áreas de atuação para a ACV são inúmeras. Segundo a ISO 14040, algumas são: avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental, contabilidade da gestão ambiental, gestão de produtos e gestão da cadeia de fornecedores.

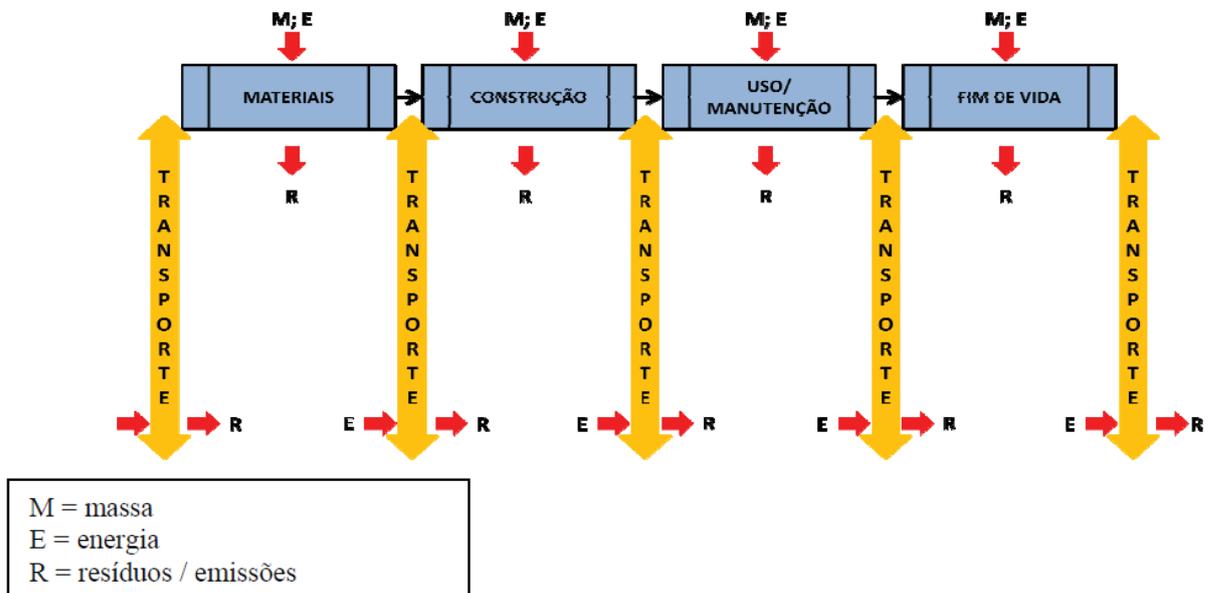
Já é possível perceber a estruturação e organização envolvendo o tema ACV no Brasil. O País oferece um vasto campo de oportunidades para aplicação da metodologia, seja em setores da indústria e agroindústria, seja na área acadêmica, cujos objetivos estão voltados para o desenvolvimento de estudos e pesquisas visando à solução de problemas na área ambiental, com possibilidade de aplicação dos resultados nos setores produtivos citados (WILLERS et al., 2013).

Para Silva (2013), ao realizar-se um estudo de ACV, verifica-se diversas limitações associadas à metodologia adotada, dentre elas, podendo ser:

- Falta de clareza em determinados estudos, tendo em vista as etapas do processo produtivo considerado.
- Adoção de fatores de emissões internacionais, prática que pode prejudicar a segurança dos resultados, já que as matrizes energéticas dos países podem apresentar diferenças.
- Conversões de unidades de fatores de emissão para adequação à unidade funcional de trabalho, promovendo um pequeno grau de incerteza de alguns resultados.

Ainda, Silva (2013) destaca que há diversos indicadores ambientais que podem ser utilizados durante um estudo de ACV e que são escolhidos pelos autores de acordo com o objetivo e o escopo do trabalho a ser realizado. Para realizar uma ACV de edificações, os autores, usualmente, elegem uma das fases do ciclo de vida para analisar, entretanto, diversos trabalhos têm apresentado resultados provenientes de uma ACV completa, abrangendo todas as etapas de uma edificação (Figura 3).

Figura 3- Fases do ciclo de vida das edificações.



Fonte: Silva (2013).

Conforme Rodrigues et al. (2008), uma dificuldade importante nos estudos de ACV é o grande número de dados necessários para análise, pois envolve a manipulação de um grande volume de informações, sendo necessário o uso de ferramentas computacionais. Apesar de algumas diferenças existentes, que podem ser interessantes para alguns e desvantagens para outros, percebe-se uma grande similaridade entre as funções dos softwares e uma proximidade em termos de desempenho e qualidade.

2.2 Impactos ambientais gerados pela extração, produção e transporte das matérias primas utilizadas na produção do concreto armado

As matérias primas, na maioria das vezes, são processadas de alguma forma e transportadas antes de sua utilização. Estes processos e transportes podem ter um impacto

menor ou mais extensivo no meio ambiente, dependendo do tipo de material e do sistema de extração, produção e distribuição (CARNEIRO et al., 2009).

De acordo com Costa (2012), a produção de materiais utilizados na construção de edificações resulta em diversos impactos ambientais diretos ou indiretos, como a alteração de habitat natural e extração de combustíveis fósseis e minerais (quando da obtenção de insumos para as indústrias), aumento da temperatura global (quando da emissão de gases de efeito estufa), acidificação eutrofização, entre outros.

2.2.1 Aglomerante (cimento)

O cimento, um dos materiais mais utilizados na construção civil, é encontrado em vários tipos, diferindo quanto a sua composição. Segundo a Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP), o mercado nacional dispõe de oito opções, que atendem com igual desempenho aos mais variados tipos de obras, diferenciando-se de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio de material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem.

A partir do estudo das emissões de CO₂ no setor cimenteiro e na produção de concreto no Brasil, pode-se identificar os principais fatores que interferem nestas emissões e quantificar os potenciais de mitigação de ações específicas, comparando-os entre si. Isso pode ser importante para mostrar o potencial de ações sobre a produção do concreto, pois o foco de ações de mitigação tem sido do setor cimenteiro, havendo número limitado de pesquisas que tratam especificamente da mitigação por ações no segmento de concreto (LIMA, 2010).

Ainda segundo Lima (2010), a produção de concreto apresenta vários fatores de aumento do consumo de cimento, como variabilidade nas condições de produção e perdas que levam à grande aumento das emissões associadas ao concreto. Parcela considerável deste aumento das emissões é evitável e, portanto, ações específicas na produção e aplicação do concreto em obras têm potencial considerável de redução das emissões de CO₂.

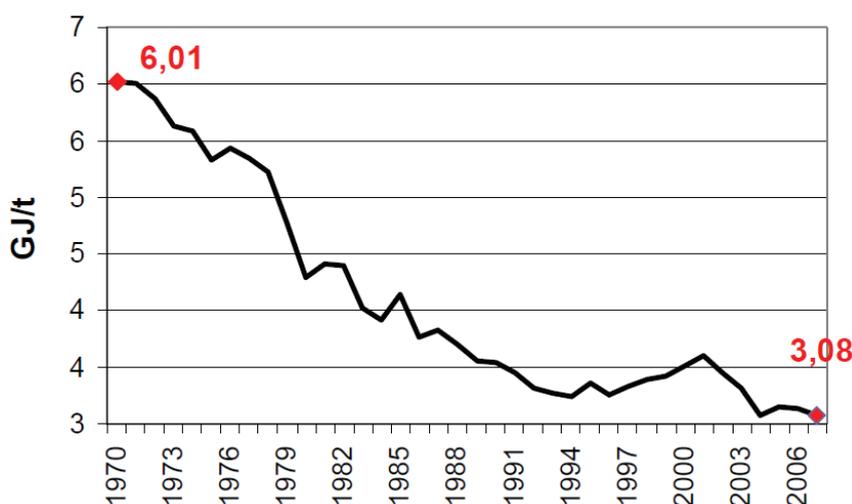
Carvalho (2008) refere-se a aspectos e impactos ambientais nas fases de produção do cimento, desde a etapa de extração da matéria prima onde existem vibrações do terreno e consequente desmoronamentos e erosões, emissões gasosas com poluição do ar, cavas abandonadas com desmoronamentos e erosões. Já na fase de produção do cimento e clínquerização existem emissões de gases como o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), gases oxidantes, óxidos nitrogenados e compostos de chumbo que geram aquecimento global e poluição do ar.

Toledo (2008) refere que a produção anual do Brasil é de 38 milhões de toneladas de cimento portland (comum), o qual libera para a atmosfera aproximadamente 22,8 milhões de toneladas/ano de gás carbônico, o equivalente a 10% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) do país.

Já Oliveira (2007) relata que a questão das emissões associadas à produção do clínquer é um dos principais componentes da “pegada ecológica” da construção. Estima-se que cerca de 6% do dióxido de carbono (CO₂) gerado no Brasil seja oriundo da descarbonatação do calcário que ocorre durante a produção de cimento.

Lima (2010) observa que o consumo energético unitário na produção do cimento sofreu reduções entre 1970 e 2007, chegando a 3,08 GJ/t, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 – Consumo unitário de energia na produção de cimento no Brasil (1970-2007).



Fonte: Lima (2010).

Um dos fatores que levaram a isto foi o aumento do uso de tecnologias mais modernas, com redução gradativa do uso do sistema a úmido, além do aumento do uso de adições a partir da década de 1980 (LIMA, 2010).

2.2.2 Agregado miúdo (areia natural e areia de britagem)

O agregado miúdo (areia) utilizado na produção do concreto é resultante da degradação das rochas por agentes naturais, “areia natural” ou pela ação do homem com a utilização de processo mecânico de britagem das rochas, “areia de britagem”.

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define os agregados miúdos conforme abaixo:

Agregado, material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto;

Agregado natural, material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem;

Agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 μm , atendidos os requisitos da ABNT NBR 7211.

Areia, agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, ou provenientes de processo industriais. É chamada de areia natural se resultante de ação de agentes da natureza, de areia artificial quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processo de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas.

Quando da utilização da areia natural, os impactos ambientais provocados pela sua extração podem ser mais extensivos, visto que a maior parte da produção é proveniente de leitos de rios, podendo vir a causar degradação destes leitos.

Segundo Souza (2012), é possível perceber, na Tabela 1, que as atividades de extração e beneficiamento de areia, além de ter uma maior demanda por recursos renováveis, são também responsáveis pelas maiores quantidades de emissões atmosféricas (44% cada uma). Verificou-se que 99,8% das emissões atmosféricas são oriundas do dióxido de carbono, o CO_2 , embora não afete diretamente a saúde humana, é um dos gases causadores do aquecimento global pela acentuação do efeito estufa.

Tabela 1 – Emissões atmosféricas totais nas etapas de ciclo de vida da areia.

Emissões atmosf.	Atividade 1	Atividade 2	Atividade 3	Atividade 4	Total
	Kg.m ⁻³ de areia				
C_xH_y	0,48E-04	0,48E-04	0,72E-05	0,28E-02	0,29E-02
CO	0,12E-02	0,12E-02	0,18E-03	0,23E-02	0,49E-02
NO_x	0,14E-02	0,14E-02	0,21E-03	1,04E-02	0,13E-01
MP	0,24E-03	0,24E-03	0,24E-03	0,81E-02	0,48E-03
SO_x	0,47E-03	0,47E-03	0,36E-04	0,17E-02	0,26E-02
CH_4	0,60E-05	0,60E-05	0,90E-06	0	0,13E-04
N_2O	0,26E-04	0,26E-04	0,40E-05	0,88E-05	0,65E-04
CO_2	0,52E+01	0,52E+01	0,08E+01	0,06E+01	11,8
Total	5,20	5,20	0,80	0,62	11,82

Atividade 1 – Extração / Atividade 2 – Beneficiamento / Atividade 3 – Armazenagem / Atividade 4 - Transporte

Fonte: Souza (2012).

2.2.3 Agregado graúdo (brita)

O agregado graúdo (brita) utilizado na produção de concreto é o produto resultante da diminuição artificial de uma rocha, geralmente, com o uso de britadores.

Neste contexto pode-se destacar que a NBR 9935 (ABNT, 2011) define em relação a agregados graúdos:

Agregado como material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto;

Agregado natural como material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem;

Agregado graúdo como material cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, atendidos os requisitos da ABNT NBR 7211.

De acordo com Bitar (1997), a mineração provoca um conjunto de efeitos não desejados que podem ser denominados de externalidades. Algumas dessas externalidades são: alterações ambientais, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtornos ao tráfego urbano. Estas externalidades geram conflitos com a comunidade, que, normalmente, têm origem quando da implantação do empreendimento, pois o empreendedor não se informa sobre as expectativas, anseios e preocupações da comunidade que vive nas proximidades da empresa de mineração.

Além destas externalidades, têm-se, ainda, as emissões atmosféricas e o consumo de energia dos processos de extração, beneficiamento, armazenagem e transporte dos agregados graúdos até sua utilização.

2.2.4 Aço

O aço, material utilizado na composição do concreto armado, é produzido pela indústria siderúrgica no Brasil.

Segundo Milanez e Porto (2009), o consumo de energia é um importante indicador para o debate sobre siderurgia, ambiente e sociedade, uma vez que a produção de energia tem diferentes impactos, e à medida que seu consumo for reduzido, menor será a necessidade de sua produção. A produção siderúrgica é caracterizada por sua grande necessidade de energia, principalmente térmica, para fundir o ferro-gusa e, assim, conseguir transformá-lo em aço. Uma alternativa para tentar reduzir o impacto do setor, pelo menos do ponto de vista das

mudanças climáticas, é a substituição do carvão mineral, por carvão vegetal. Como o carvão vegetal é oriundo de fontes renováveis, parte do CO₂ emitido na sua queima é reciclado no crescimento das árvores, assim, sua contribuição efetiva para as mudanças climáticas é menor do que a do carvão mineral.

As usinas integradas são aquelas que produzem aço a partir do minério de ferro, usando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor, nos altos fornos, para obtenção do ferro metálico, cabendo ressaltar que o carvão vegetal somente é usado em altos fornos de menor capacidade.

As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e usam sucata de aço e ferro gusa para alimentar as aciarias elétricas. A rota semi-integrada reduz o consumo de recursos naturais não renováveis. No entanto, para haver aumento expressivo da produção de aço por essa rota, é necessário haver maior geração de sucata de aço que, por sua vez, está condicionada ao aumento do consumo de produtos intensivos em aço, como automóveis, geladeiras, fogões, expansão das obras de infraestrutura e de construção civil.

A questão é que, no Brasil, o consumo per capita de aço vem tendo crescimento muito lento e, nos últimos 30 anos, evoluiu de 100 kg/habitante/ano para aproximadamente 130 kg/habitante/ano, enquanto, na maior parte dos países desenvolvidos e na China, esse consumo é superior a 400 kg/habitante/ano (CNI, 2012).

Ainda segundo a Confederação Nacional da Indústria, Instituto Aço Brasil (2012), medidas estão sendo adotadas pelas siderúrgicas para redução das emissões de CO₂, sendo que muitas empresas siderúrgicas no mundo e, especialmente, no Brasil, já estão operando próximo aos menores níveis de emissões de CO₂ possíveis com a melhor tecnologia, atualmente, disponível para produção de aço. Mesmo assim, a indústria do aço vem realizando pesquisas visando a encontrar alternativas para a redução das emissões de CO₂. Os esforços são coordenados pela World Steel Association (entidade que congrega a siderurgia mundial) no projeto ULCOS (Ultra Low CO₂ on Steelmaking), em cooperação com universidades, institutos de pesquisa e outras indústrias, para identificar e desenvolver novas abordagens para a produção do aço com menor índice de emissão de CO₂.

2.3 Otimização de estruturas de concreto armado visando a minimização do impacto ambiental

Otimizar consiste em buscar racionalmente o melhor dentre os valores possíveis para dadas variáveis, em função de um determinado objetivo e das limitações existentes.

Dentre as aplicações da otimização, exemplifica-se a busca de redução de peso ou custo de uma estrutura; o aumento de eficiência de elementos estruturais; a redução de perdas no processo; a determinação da melhor rota para transporte de passageiros ou cargas; a determinação da melhor mistura de componentes, buscando melhor custo ou maior eficiência; o aumento da produtividade em processos de fabricação; o aumento da eficiência na alocação de recursos.

No caso de otimização estrutural, busca-se, de forma geral, a minimização dos custos para uma estrutura que satisfaça aos princípios básicos de segurança, respeitando-se os Estados Limites Últimos e de Serviço, bem como as demais imposições de normas técnicas (MEDEIROS, 2012).

Um problema de otimização pode, de forma geral, ser assim descrito:

Minimizar ou maximizar:

$$f(x_i), \text{ sendo } i = 1, n \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_j(x_i) \leq 0, \text{ sendo } j = 1, m \quad (2)$$

$$h_k(x_i) = 0, \text{ sendo } k = 1, l \quad (3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (4)$$

Na Equação 1, $f(x)$ representa a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar, a qual, normalmente, está relacionada a alguma quantidade numérica (medida quantitativa do desempenho do sistema analisado). É uma função de x , sendo x o vetor das variáveis do problema. São elementos ou fatores que influenciam no valor final da função a ser otimizada.

As relações expostas nas equações 2 e 3 são chamadas, respectivamente, de restrições de desigualdade e restrições de igualdade. A equação 4 representa as restrições laterais, com limites inferior e superior do espaço de busca viável.

O interesse pela área de pesquisa em otimização de estruturas de concreto armado teve início na década de 50, destacando-se o trabalho de J. Heyman, que utilizou programação linear para otimizar estruturas no regime plástico. Posteriormente, na década de 60, pode-se destacar o trabalho de L. A Schimit, que utilizou técnicas de programação não linear em otimização de projetos estruturais. No entanto, foi na década de 70 que diversos trabalhos relevantes foram desenvolvidos, sendo estes estudos os principais responsáveis pela difusão dos processos de otimização pela comunidade mundial (BASTOS, 2004).

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura envolvendo a otimização de estruturas tendo como objetivo a minimização do impacto ambiental. Paya et al. (2008) empregaram a otimização multiobjetivo para o estudo de distintos objetivos, incluindo o custo *versus* construtibilidade, custo *versus* segurança global e custo *versus* sustentabilidade, tais como o consumo de energia ou as emissões de CO₂.

Yeo e Gabbai (2011) buscaram otimizar uma viga de concreto armado levando em conta toda a energia consumida pelo concreto e pelo aço durante o ciclo de vida dos mesmos. Foi feita a otimização do custo monetário e, posteriormente, a minimização do consumo de energia de fabricação da viga. Observando os resultados obtidos, verifica-se que, na viga onde houve a otimização do consumo de energia, o valor de seu custo econômico final teria o aumento de cerca de 5% em relação à viga, onde se otimizou o custo monetário. No entanto, em relação ao consumo de energia, verifica-se que a redução do consumo de energia, em relação à viga que foi otimizada pelo custo monetário, seria da ordem de 10%. Demonstrando que para reduzir em 10% o consumo de energia teríamos um acréscimo de 5% no custo da viga.

Medeiros (2012) efetuou a otimização dos custos monetários e ambientais de seções de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta, utilizando o método de otimização da Busca Harmônica. Nos exemplos que visaram à otimização de custos monetários das seções de concreto, de forma geral, o método da Busca Harmônica obteve soluções ótimas melhores, ou pelo menos iguais, aos resultados alcançados por dimensionamento convencional, otimização matemática, Algoritmos Genéticos e *Simulated Annealing*. Já para custos ambientais, concluiu-se que a otimização de custos monetários relaciona-se diretamente com a redução de custos ambientais, tendo em vista que à medida que os diferentes métodos de otimização foram propondo melhores soluções monetárias, esses resultados também se mostraram mais vantajosos em termos ambientais. Por meio de outras duas aplicações numéricas desenvolvidas envolvendo custos ambientais, verificou-se também que as soluções ótimas em custos monetários apresentam desempenho ambiental muito

satisfatório, pouco se distanciando, para a maioria dos custos ambientais verificados (Potencial de Aquecimento Global – GWP, emissão de CO₂ e consumo de energia), da melhor solução ambiental.

3. LEVANTAMENTOS DAS EMISSÕES DE CO₂ E DOS CONSUMOS DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO E TRANSPORTE DAS MATÉRIAS PRIMAS E NA PRODUÇÃO E TRANSPORTE DO CONCRETO ATÉ A OBRA

As necessidades de construção civil continuam em crescimento constante. O déficit habitacional, as ampliações e reformas demandam cada vez mais matérias primas como agregados graúdos, miúdos, aglomerante e aço, pois as mesmas fazem parte da produção de vários materiais utilizados na construção civil, dentre eles, o concreto armado.

O transporte destas matérias primas é outro aspecto considerado, visto que a maioria delas é de origem mineral e, conforme Aguirre e Hennies (2010), o transporte é necessário sempre que o local de origem é diferente do local de consumo ou destino. Este conceito é muito forte quando se tratar de mineração, devido à ocorrência das rochas e minérios dar-se pelo capricho da natureza e não em local definido através de estudos matemáticos, financeiros e de planejamento estratégico. Daí, os transportes serem significativos e merecedores de consideração e atenção especial.

Nos levantamentos realizados, foi considerada a emissão de CO₂ da combustão do diesel, um dos elementos de utilização primordial nos processos de extração, produção e transporte das matérias primas. A maioria das etapas demanda transportes e movimentações com a utilização de equipamentos, onde o diesel é o combustível. A emissão de CO₂ do processo de combustão da gasolina aditivada, utilizada nos veículos de apoio nas empresas envolvidas no processo, também foi considerada.

A emissão de CO₂ do processo de combustão do diesel e da gasolina aditivada, utilizados neste estudo é proveniente do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2011).

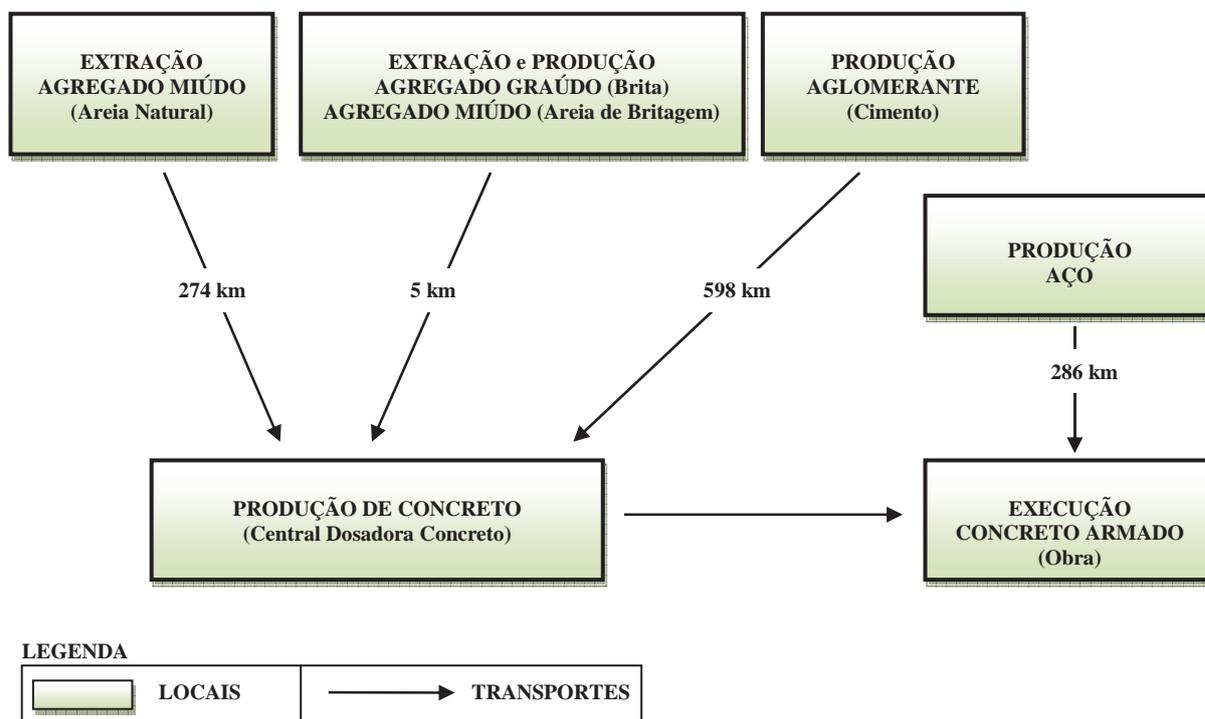
Este inventário apresenta como fator de emissão o valor de:

2,671 kg de CO₂ para cada litro de diesel consumido.

2,269 kg de CO₂ para cada litro de gasolina Aditivada consumida.

A emissão proveniente do transporte destas matérias primas foi calculada considerando as distâncias dos mesmos até o local de utilização, conforme informações fornecidas pela responsável da central dosadora de concreto, sendo o agregado graúdo (brita) e o agregado miúdo (areia de britagem) produzidos na cidade de Passo Fundo a 5 km de distância; o agregado miúdo (areia natural) extraído na cidade de Santa Maria a 274 km de distância; o aglomerante (cimento) produzido na cidade de Rio Branco do Sul a 598 km de

Figura 5 – Regiões de levantamento de dados.



Fonte: O autor (2015).

3.1 Emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica - produção e transporte do agregado graúdo (brita) e miúdo (areia de britagem)

O mercado produtor de rochas britadas é composto por empresas de vários tamanhos, variando desde as mineradoras típicas, cujo principal produto é a própria brita, em suas várias granulações, até empresas pertencentes a grupos produtores de cimento e/ou concreto, funcionando de maneira verticalizada, sendo algumas também coligadas às construtoras de vários portes. Os mercados são essencialmente regionais, uma vez que se trata de um produto de baixo valor unitário e os preços de frete pesam no valor final do produto. Sendo assim, as empresas instaladas próximas a áreas urbanas apresentam grande diferencial competitivo, atingindo grandes capacidades instaladas, podendo fazer uso de tecnologias de produção mais avançadas, tanto na área mineral quanto ambiental (SUMÁRIO MINERAL, 2013).

O levantamento considerou as atividades utilizadas na mineradora, no processo de extração, produção e armazenamento, bem como o transporte até a central dosadora de concreto, do agregado graúdo (brita) e miúdo (areia de britagem).

O processo de extração da matéria prima, neste estudo basalto, inicia com a limpeza e perfuração do topo da jazida por uma perfuratriz, retirada da umidade nas perfurações e inserção dos explosivos nas mesmas, conforme Figura 6.

Figura 6 – Perfuração do topo da jazida.



Fonte: O autor (2015).

Após, são realizadas as detonações dos explosivos, desprendendo as rochas de basalto da jazida, que serão carregadas e transportadas até a central de britagem da mineradora, conforme Figura 7.

Chegando a central de britagem, as rochas de basalto são descarregadas, conforme Figura 8, no britador primário tipo mandíbula, onde sofre a primeira quebra, Figura 9.

Figura 7 – Carregamento das rochas de basalto.



Fonte: O autor (2015).

Figura 8 – Descarregamento das rochas de basalto no britador primário.



Fonte: O autor (2015).

Figura 9 – Desagregação das rochas no britador primário.



Fonte: O autor (2015).

Fragmentadas em tamanhos menores as pedras caem em correias transportadoras que as levam até o britador secundário e terciário, tipo cônico. Com passagem por peneiras classificatórias, são separados os agregados nas granulometrias normatizadas, Figura 10.

Estando com as dimensões desejadas, os agregados graúdos e miúdos são armazenados, ficando aguardando o carregamento em caminhões, conforme Figura 11, pesagem e transporte até a central dosadora de concreto ou a outros clientes da mineradora.

Figura 10 – Britadores, peneiras classificatória, correias e armazenamento dos agregados.



Fonte: O autor (2015).

Figura 11 – Carregamento dos agregados.



Fonte: O autor (2015).

No processo produtivo da mineradora em estudo, verificou-se a existência de perfuratriz, carregadeiras e caminhões que são utilizados na extração e movimentação dos agregados, sendo que tais máquinas utilizam diesel como combustível.

No processo de fragmentação dos agregados graúdos (brita) e miúdos (areia de britagem), os equipamentos utilizados são britadores, correias de movimentação e peneiras classificatórias. Considerando a sequência de produção, os britadores são nomeados como primário, secundário e terciário. Todos os britadores, suas correias de transporte, as peneiras classificatórias, além do escritório, balança e atividades auxiliares de manutenção, utilizam energia elétrica.

Após as visitas para conhecimento do processo produtivo e os questionamentos dos responsáveis da mineradora, foram obtidas as informações necessárias para a definição da emissão de CO₂ e o consumo de energia elétrica, informações estas que são apresentadas na Tabela 2 de maneira sintetizada:

Tabela 2 - Cálculo das emissões de CO₂ e consumos de energia elétrica das matérias primas.

Matéria Prima	Produção (kg/mês)	Consumo Energia Elétrica (kWh/mês)	Consumo Diesel (l/mês)	Consumo Diesel (l/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Consumo Energia Elétrica (Kwh/kg)
Agregado Graúdo (brita) e Miúdo (areia britagem)	10.000.000	30.000	15.000	0,001500	2,671	0,004007	0,003000

Fonte: O autor (2015).

Os dados sobre o transporte do agregado graúdo e miúdo até a Central Dosadora de Concreto foram informados pelos responsáveis da mineradora, sendo os mesmos apresentados na Tabela 3, que apresenta também os valores de emissões de CO₂ desta etapa.

Tabela 3 - Cálculo das emissões de CO₂ do transporte das matérias primas.

Matéria Prima	Carga Transportada (kg/viagem)	Consumo Diesel (l/viagem)	Consumo Diesel (l/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Agregado Graúdo (brita)	23.000	5	0,000217	2,671	0,000580
Agregado Miúdo (areia britagem)	21.000	5	0,000238	2,671	0,000636

Fonte: O autor (2015).

3.2 Emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do agregado miúdo (areia natural)

No Brasil, a areia de construção é produzida em todas as unidades da Federação. As duas principais fontes de extração são os leitos de rios (extração por dragagem) e as várzeas (extração em cavas), sendo que a participação relativa de cada uma destas fontes varia conforme a região. Os principais usos da areia estão na preparação de concreto, argamassa, pré-fabricados e pavimentação. Um substituto para o consumo da areia para construção é a chamada areia artificial (areia de britagem), produto secundário do processo de beneficiamento de pedra britada. Tal material vem ganhando relevância no mercado, principalmente em regiões com escassez de oferta da areia tradicional, sendo importante ressaltar, no entanto, que o potencial de oferta de areia artificial (britagem) é condicionado à produção de pedra britada (SUMÁRIO MINERAL, 2013).

O levantamento considerou as atividades utilizadas no processo de extração, produção, armazenamento e transporte do agregado miúdo (areia natural) da mineradora até a central dosadora de concreto.

No caso em estudo, o processo de extração inicia com a dragagem da jazida, de onde é retirada a matéria prima, sendo a mesma armazenada ao lado da jazida para o processo de secagem natural, conforme Figuras 12 e 13.

Após o processo de secagem, a matéria prima é carregada e levada até o local de armazenamento final, onde são realizados os processos de medições ou pesagens, para posterior liberação aos clientes, conforme Figuras 14 e 15.

Figura 12 – Dragagem da jazida.



Fonte: O autor (2015).

Figura 13 – Armazenamento para secagem.



Fonte: O autor (2015).

Figura 14 – Carregamento da matéria prima.



Fonte: O autor (2015).

Figura 15 – Armazenamento final.



Fonte: O autor (2015)

No processo produtivo da mineradora em estudo, verificou-se a existência de dragas, carregadeiras e caminhões que são utilizados na extração e movimentação do agregado miúdo natural, sendo que tais máquinas utilizam diesel como combustível.

A utilização de energia elétrica foi verificada na área de escritórios, balança e atividades auxiliares de manutenção.

Após visita para conhecimento do processo produtivo e questionamentos dos responsáveis da mineradora, foram obtidas as informações necessárias para a definição da emissão de CO₂ e o consumo de energia, informações estas que são apresentadas na Tabela 4 de maneira sintetizada:

Tabela 4 - Cálculo da emissão de CO₂ e consumo de energia elétrica da matéria prima.

Matéria Prima	Produção (kg/mês)	Consumo Energia Elétrica (kWh/mês)	Consumo Diesel (L/mês)	Consumo Diesel (L/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /L)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Consumo Energia Elétrica (Kwh/kg)
Agregado Miúdo (areia natural)	16.549.000	454	22.000	0,001329	2,671	0,003550	0,000027

Fonte: O autor (2015).

Em relação ao transporte do agregado miúdo (areia natural) até a Central Dosadora de Concreto, foram levantados os dados que são apresentados na Tabela 5 de maneira sintetizada.

Tabela 5 - Cálculo da emissão de CO₂ do transporte da matéria prima.

Matéria Prima	Carga Transportada (kg/viagem)	Consumo Diesel (L/viagem)	Consumo Diesel (L/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /L)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Agregado Miúdo (areia natural)	28.000	250	0,008929	2,671	0,023849

Fonte: O autor (2015).

3.3 Emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do aglomerante (cimento)

O consumo de cimento no Brasil, no ano de 2012, teve um acréscimo de 7,4% em relação ao ano anterior, houve elevação do consumo em todas as regiões brasileiras, ficando um consumo médio de cimento por habitante, em 2012, de aproximadamente 340 kg. Dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento mostram que o cimento ensacado respondeu por 67% dos despachos, enquanto o restante foi despachado na forma de granel. Em relação ao perfil de distribuição do cimento portland, produzido no Brasil, os revendedores adquiriram 54,3% da produção das fábricas, os consumidores industriais 31,9% e o restante 13,8% foi destinado a consumidores finais, como as construtoras, empreiteiras, prefeituras e órgãos públicos (SUMÁRIO MINERAL, 2013).

Os valores de emissão de CO₂ no processo de produção do cimento considerado neste trabalho são oriundos do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produtos Minerais, Produção de Cimento, publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, elaborado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC e Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP no ano de 2010. Este relatório cobre unicamente as emissões de CO₂ da indústria de cimento referentes ao processo produtivo, sendo que o processo produtivo do cimento é, resumidamente, uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas, sua transformação química em clínquer (produto intermediário do cimento) em um forno acerca de 1.450 °C e posterior moagem e mistura a outros materiais, conforme o tipo de cimento.

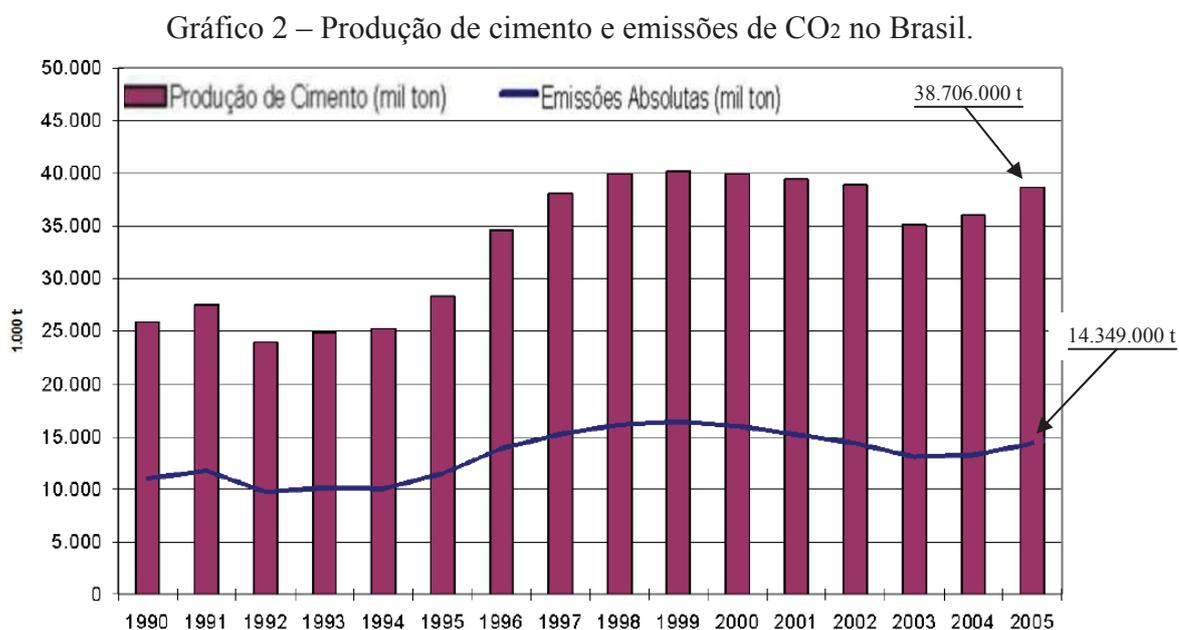
O dióxido de carbono (CO₂) é emitido durante a produção do clínquer, sendo que a fabricação do clínquer portland pode ser dividida, basicamente, em quatro tipos diferentes, via úmida, via semi-úmida, via semi-seca e via seca, dependendo da umidade das matérias primas. Nos fornos via seca, os mais empregados hoje no mundo, as matérias primas ingressam no forno previamente secas, garantindo uma maior eficiência energética, economia de combustíveis e menores emissões de gases de efeito estufa.

Os dados para este inventário foram obtidos através de séries históricas específicas das plantas, para que as estimativas das emissões pudessem ser calculadas pelo método mais acurado possível.

Os dados coletados compreenderam os teores de CaO e MgO que compõem a produção de clínquer por planta ao ano, a quantidade de clínquer produzida, adquirida e

vendida por planta ao ano, a quantidade de cimento produzida por tipo e as quantidades dos compostos minerais como gesso, escória, pozolanas utilizados para a produção de cimento.

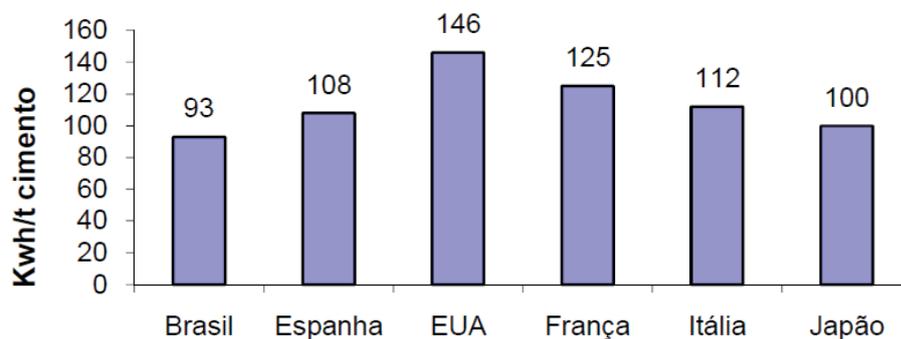
O Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Produção de Cimento (2010) apresenta que, no ano de 2005, conforme Gráfico 2, para uma produção de 38.706.000 toneladas de cimento gerou-se a emissão de 14.349.000 toneladas de CO₂, obtendo-se um fator de emissão de 0,371 toneladas de CO₂ / tonelada de cimento produzido ou 0,371000 kg CO₂ / kg de cimento produzido.



Fonte: Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Produção de Cimento (2010).

Em relação ao consumo de energia elétrica na produção de cimento, o projeto de assistência técnica ao setor de energia do Ministério de Minas e Energia, elaborado, em 2009, para o perfil do cimento, apresenta como consumo médio de energia o valor de 93 Kwh por tonelada de cimento produzido, ou 0,093000 Kwh/kg de cimento produzido, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3: Consumo de energia elétrica por tonelada de cimento.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2009).

Além da produção, o transporte do cimento da fábrica até o local de utilização, no estudo, a central dosadora de concreto foi considerado. Constatou-se que o cimento utilizado na produção do concreto vem da cidade de Rio Branco do Sul no estado do Paraná.

Considerou-se o transporte de uma carga completa, fechada e exclusiva, para a central dosadora de concreto conforme Figura 16.

Figura 16 – Caminhão de transporte de aglomerante (cimento) a granel.



Fonte: Autor (2015).

Os dados levantados e os cálculos realizados são apresentados na Tabela 6 de maneira sintetizada.

Tabela 6 - Cálculo da emissão de CO₂ do transporte da matéria prima.

Matéria Prima	Carga Transportada (kg/viagem)	Consumo Diesel (L/viagem)	Consumo Diesel (L/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /L)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Aglomerante (cimento)	32.000	580	0,018125	2,671	0,048412

Fonte: O autor (2015).

3.4 Emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do aço

A indústria do aço está associada à história de desenvolvimento do Brasil, visto que dela sai o aço para a produção e execução das hidrelétricas, torres de transmissão, edifícios, pontes, viadutos, máquinas e equipamentos das indústrias, meios de transporte, entre outros, estando presente em todos os momentos de nosso dia-a-dia.

As vendas internas de produtos siderúrgicos, em 2012, tiveram um inexpressivo aumento de 0,7% em relação a 2011, totalizando 21.588 mt, sendo que, por setor, o consumo ficou assim distribuído: Construção Civil (35,4%), Automotivo (24,7%), Máquinas e Equipamentos (20,7%), Utilidades Domésticas e Comerciais (6,5%), Embalagens e Recipientes (3,1%) e outros (9,6%). O consumo per capita de aço bruto no Brasil foi de 128,1 kg/habitante. A expectativa de que os programas governamentais de habitação e infraestrutura, projetos nas áreas de petróleo e gás e as obras para eventos como Copa do Mundo e Olimpíadas alavancassem o consumo interno não se concretizou, devido, principalmente, à competição com os produtos importados (SUMÁRIO MINERAL, 2013).

O valor de emissão de CO₂ no processo siderúrgico de produção do aço considerado neste trabalho é oriundo do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produção de Metais, Ferro e Aço, publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e elaborado pelo Instituto Aço Brasil e suas associadas no ano de 2010.

Este Inventário foi baseado na metodologia descrita no IPCC 2006 *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (GNGGI)*. As metodologias de cálculo adotadas neste Inventário basearam-se nos seguintes documentos:

- IPCC (2000) Good Practice Guidance and Uncertainly Management in National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC (2006) – Volume 3 - Industrial Processes and Product Use (IPPU), Chapter 4 - Metal Industry Emissions.

O Guidelines 1996 e o Good Practice Guidance 2000 apresentam três abordagens metodológicas (Tier 1, 2 e 3) para cálculo das emissões de gases de efeito estufa que variam em função do nível de complexidade e detalhamento (existência de dados), são eles:

- Tier 1: Abordagem de fatores de emissão médios com base na produção;
- Tier 2: Abordagem do balanço de massa e;
- Tier 3: Uso de fatores de emissão medidos nas empresas.

O Inventário contemplou, exclusivamente, as informações referentes às usinas produtoras de aço associadas ao Instituto Aço Brasil, correspondendo a quase 100% do total da produção de aço do país no período solicitado. Não foram consideradas as empresas CBAço e MWL Brasil, pois estas usinas já não pertenciam mais ao quadro de associadas deste Instituto.

Conforme a metodologia adotada, a emissão de CO₂ de fontes da produção de ferro e aço foi calculada utilizando dados da atividade (dados de consumo) e fatores de emissão adequados. Foram usados dados obtidos diretamente das empresas para os seguintes insumos/ matérias primas / produtos: Quantidade de aço e sinter produzido, de fundentes consumidos, de agente redutor consumido, de subprodutos produzidos e de sucata consumida.

O Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produção de Metais, Ferro e Aço apresentou, como resultado da emissão de CO₂ provenientes do processo de produção de ferro-gusa e aço, para o ano de 2006, 31.027.009 toneladas. Este mesmo inventário apresenta que a produção de ferro-gusa e aço para o mesmo ano foi de 30.608.490 toneladas, tem-se a geração de 1,014 toneladas de CO₂ / tonelada de aço produzido ou 1,014 kg CO₂ / kg de aço produzido.

Quanto ao consumo de energia no processo produtivo do aço, segundo o mesmo Inventário, a energia elétrica tem sensível repercussão na estrutura de custos do aço, sendo apresentado o consumo de 0,482 Mwh/t no ano de 2006 ou 0,482000 Kwh/kg de aço produzido.

Além da produção, o transporte do aço da siderúrgica até o local de utilização, no estudo a cidade de Passo Fundo foi considerado. Após levantamentos, constatou-se que o aço utilizado na confecção do concreto armado vem da cidade de Sapucaia do Sul, no estado do Rio Grande do Sul.

Os dados levantados do transporte do aço e os cálculos realizados são apresentados na Tabela 7 de maneira sintetizada.

Tabela 7 - Cálculo da emissão de CO₂ do transporte da matéria prima.

Matéria Prima	Carga Transportada (kg/viagem)	Consumo Diesel (l/viagem)	Consumo Diesel (l/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Aço	25.000	300	0,012000	2,671	0,032052

Fonte: O autor (2015).

3.5 Emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica – produção e transporte do concreto

A grande demanda do mercado da construção civil mantém constante a necessidade de atingir padrões mais altos de qualidade e também agilidade na produção do concreto. Para atender esta demanda, cada vez mais, novas centrais dosadoras de concreto começam novas operações, realidade que pode também ser observada na região de estudo.

A central dosadora de concreto, no qual foi realizado o levantamento, possui clientes na cidade de Passo Fundo e região. As matérias primas utilizadas, agregados graúdos e miúdos de britagem, são provenientes de mineradora da própria cidade de Passo Fundo e agregados miúdos naturais são provenientes de mineradora da cidade de Santa Maria. Estas matérias primas, transportadas por caminhões até o pátio da empresa, são armazenadas separadas em baias ao ar livre, conforme Figura 17.

O aglomerante, proveniente de empresa da cidade de Rio Branco do Sul, no estado do Paraná, é recebido a granel através de caminhão, sendo armazenado em silo da central dosadora, conforme Figura 18.

Figura 17 – Baias de armazenamento das matérias primas.



Fonte: O autor (2015).

Figura 18 – Descarregamento do aglomerante no silo da central dosadora.



Fonte: O autor (2015).

O processo produtivo do concreto inicia com o abastecimento das matérias primas (agregados graúdos e miúdos), a partir da movimentação até o local com uma pá carregadeira. Após a pesagem, as matérias primas movimentam-se através de correia transportadora até a central dosadora, onde também o silo abastece com aglomerante (cimento) a mesma.

Com o estacionamento do caminhão betoneira na dosadora, conforme Figura 19, inicia-se lentamente o processo de carregamento dos agregados e do aglomerante. No fim do processo, adiciona-se a água e aditivo, conforme quantidades definidas no traço.

Figura 19 – Carregamento das matérias primas no caminhão betoneira.



Fonte: O autor (2015).

Após o término do carregamento, o caminhão betoneira é lacrado, a nota fiscal da carga é emitida e o mesmo é liberado para realizar o transporte até o local da obra, Figura 20.

Figura 20 – Caminhão betoneira para deslocamento do concreto até a obra.



Fonte: O autor (2015).

Além das máquinas e equipamentos que constituem a central dosadora, a estrutura da empresa é composta por laboratório responsável pelo controle tecnológico, escritório responsável pela área administrativa, pá carregadeira para movimentação das matérias primas no pátio, caminhões betoneira para o transporte do concreto até a obra, bombas que transportam o concreto horizontalmente ou verticalmente na obra até a fôrma e carro de apoio, utilizado para o acompanhamento técnico nas obras.

Após acompanhar o processo produtivo e realizar o levantamento de dados necessários para o estudo com a gerência da empresa, na Tabela 8 são apresentadas as informações obtidas e na Tabela 9 os cálculos de emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica por metro cúbico de concreto produzido na central dosadora de concreto.

Tabela 8 - Produção e consumo de energia elétrica e diesel por metro cúbico de concreto.

Material	Produção (m ³ /mês)	Consumo Energia Elétrica (kwh/mês)	Consumo Diesel Pá Carregadeira (l/m ³)	Consumo Diesel Caminhão Betoneira (l/m ³)	Consumo Diesel Bomba (l/m ³)	Consumo Gasolina A Carro Apoio (l/m ³)
CONCRETO	3.000	6.500	0,21	2,37	0,85	0,10

Fonte: O autor (2015).

Tabela 9 - Cálculo das emissões de CO₂ e consumo de energia por metro cúbico de concreto.

Material	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ Pá Carregadeira (kgCO ₂ /m ³)	Emissão CO ₂ Caminhão Betoneira (kgCO ₂ /m ³)	Emissão CO ₂ Bomba (kgCO ₂ /m ³)	Emissão CO ₂ Carro Apoio (kgCO ₂ /m ³)	Consumo Energia Elétrica (kwh/m ³)
Concreto	2,671	0,560910	6,330270	2,270350	0,226900	2,166667

Fonte: O autor (2015).

Com a conclusão dos levantamentos e cálculos das emissões de CO₂ e consumos de energia elétrica de todas as matérias primas do processo de produção do concreto armado, são apresentados na Tabela 10 todos os valores da etapa de extração e produção e na Tabela 11 de transporte até na central dosadora de concreto.

Tabela 10 - Cálculo da emissão de CO₂ e consumo de energia elétrica das matérias primas.

Matéria Prima	Produção (kg/mês)	Consumo Energia (kWh/mês)	Consumo Diesel (l/mês)	Consumo Diesel (l/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Consumo Energia Elétrica (kwh/kg)
Agregado Graúdo (brita) e Miúdo (areia britagem)	10.000.000	30.000	15.000	0,001500	2,671	0,004007	0,003000
Agregado Miúdo (areia natural)	16.549.000	454	22.000	0,001329	2,671	0,003550	0,000027
Aglomerante (cimento)	--	--	--	--	--	0,371000	0,093000
Aço	--	--	--	--	--	1,014000	0,482000

Tabela 11 - Cálculo da emissão de CO₂ dos transportes das matérias primas.

Matéria Prima	Carga Transportada (kg/viagem)	Consumo Diesel (l/viagem)	Consumo Diesel (l/kg)	Emissão CO ₂ Diesel (kgCO ₂ /l)	Emissão CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Agregado Graúdo (brita)	23.000	5	0,000217	2,671	0,000580
Agregado Miúdo (areia britagem)	21.000	5	0,000238	2,671	0,000636
Agregado Miúdo (areia natural)	28.000	250	0,008929	2,671	0,023849
Aglomerante (cimento)	32.000	580	0,018125	2,671	0,048412
Aço	25.000	300	0,012000	2,671	0,032052

4. ANÁLISE DOS DADOS LEVANTADOS COM AVALIAÇÕES E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

Apresentam-se, na sequência, os resultados obtidos a partir dos levantamentos efetuados, de maneira que possam ser verificadas as contribuições nas emissões de CO₂ e no consumo de energia elétrica de cada matéria prima utilizada na produção do concreto armado, bem como a parcela de contribuição do processo de produção e transporte do concreto até a obra pela central dosadora de concreto.

4.1 Emissões de CO₂ das matérias primas

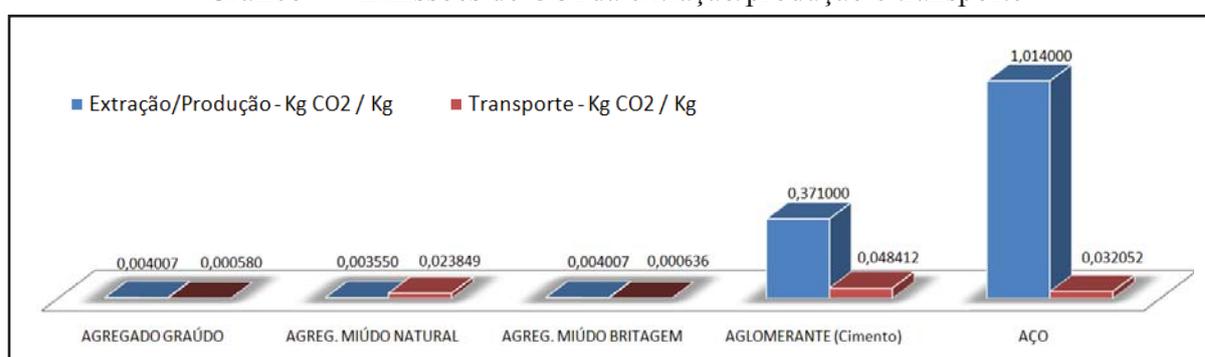
Os resultados levantados e apresentados na Tabela 12 e Gráficos 4 e 5 indicam que a maior emissão das matérias primas em estudo, na fase de extração e produção, ocorre com o aço e, na fase de transporte, ocorre com o aglomerante (cimento). Verifica-se também que o agregado miúdo natural tem mais que 87 % de suas emissões provenientes do seu transporte.

Tabela 12 – Emissões de CO₂ da extração/produção e transporte.

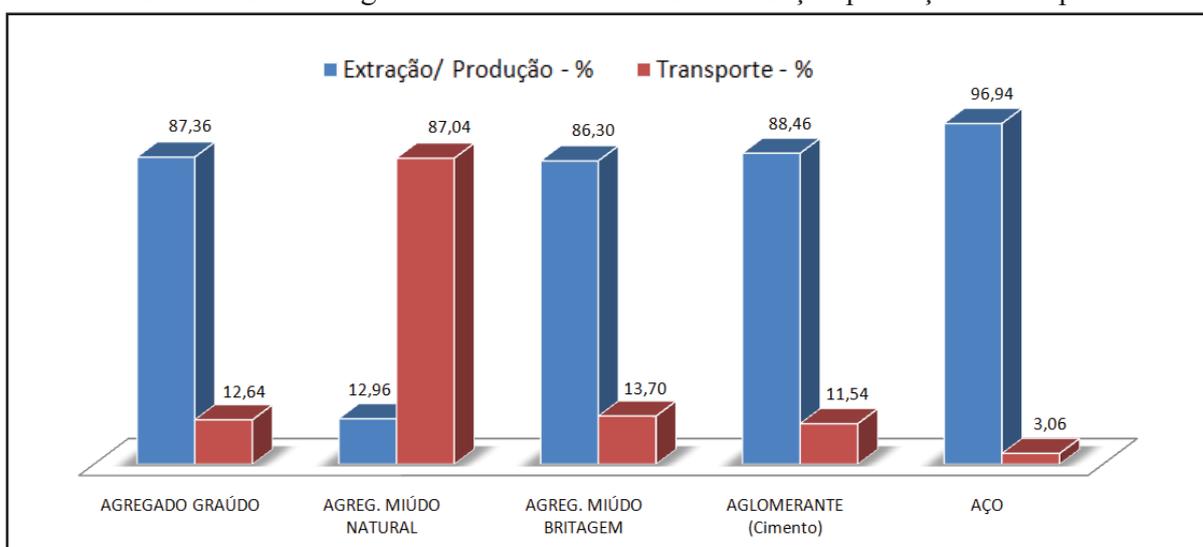
MATÉRIA PRIMA	EMISSIONES DE CO ₂				
	Extração/Produção Kg CO ₂ / Kg	Transporte Kg CO ₂ / Kg	Total Kg CO ₂ / Kg	Extração/ Produção %	Transporte %
AGREGADO GRAÚDO	0,004007	0,000580	0,004587	87,36	12,64
AGREG. MIÚDO NATURAL	0,003550	0,023849	0,027399	12,96	87,04
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	0,004007	0,000636	0,004643	86,30	13,70
AGLOMERANTE (Cimento)	0,371000	0,048412	0,419412	88,46	11,54
AÇO	1,014000	0,032052	1,046052	96,94	3,06

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 4 – Emissões de CO₂ da extração/produção e transporte



Fonte: O autor (2015).

Gráfico 5 – Porcentagens de emissões de CO₂ da extração/produção e transporte.

Fonte: O autor (2015).

4.2 Consumos de energia elétrica das matérias primas

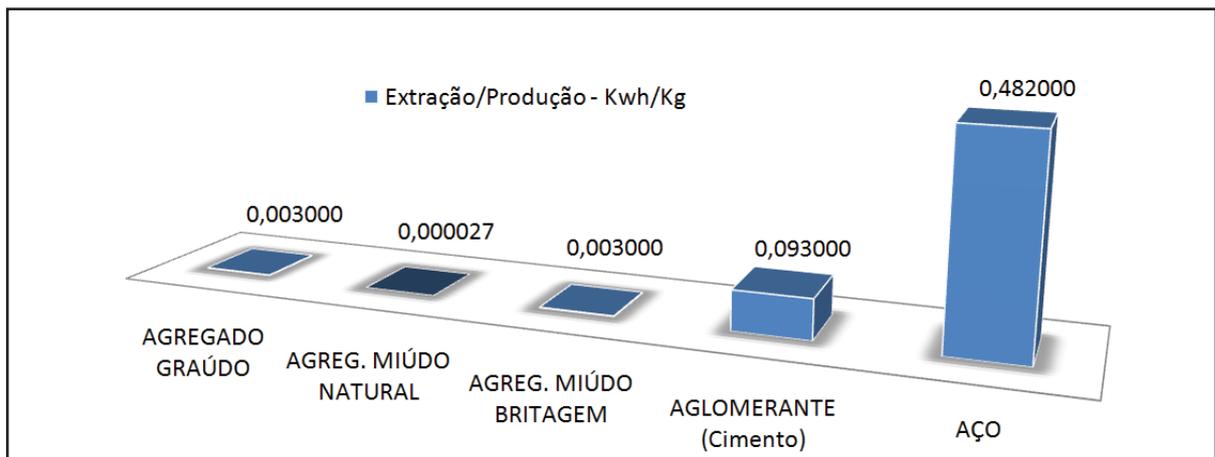
Quando avaliada a questão do consumo de energia elétrica, verifica-se que a matéria prima com maior consumo é também o aço, tendo, em segundo lugar, o aglomerante (cimento). Os valores levantados das matérias primas podem ser verificados na Tabela 13 e no Gráfico 6.

Tabela 13 – Consumo de energia elétrica da extração/produção.

MATÉRIA PRIMA	CONSUMO DE ENERGIA
	Extração/Produção Kwh/Kg
AGREGADO GRAÚDO	0,003000
AGREG. MIÚDO NATURAL	0,000027
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	0,003000
AGLOMERANTE (Cimento)	0,093000
AÇO	0,482000

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 6 – Consumo de energia elétrica da extração/produção.



Fonte: O autor (2015).

4.3 Emissões de CO₂ das matérias primas utilizadas na produção de um metro cúbico de concreto

Com os dados obtidos nos levantamentos e apresentados anteriormente, realizou-se a quantificação das emissões das matérias primas para a composição de um metro cúbico de concreto, trabalhando-se com traços de resistência característica de 20 e 40 MPa.

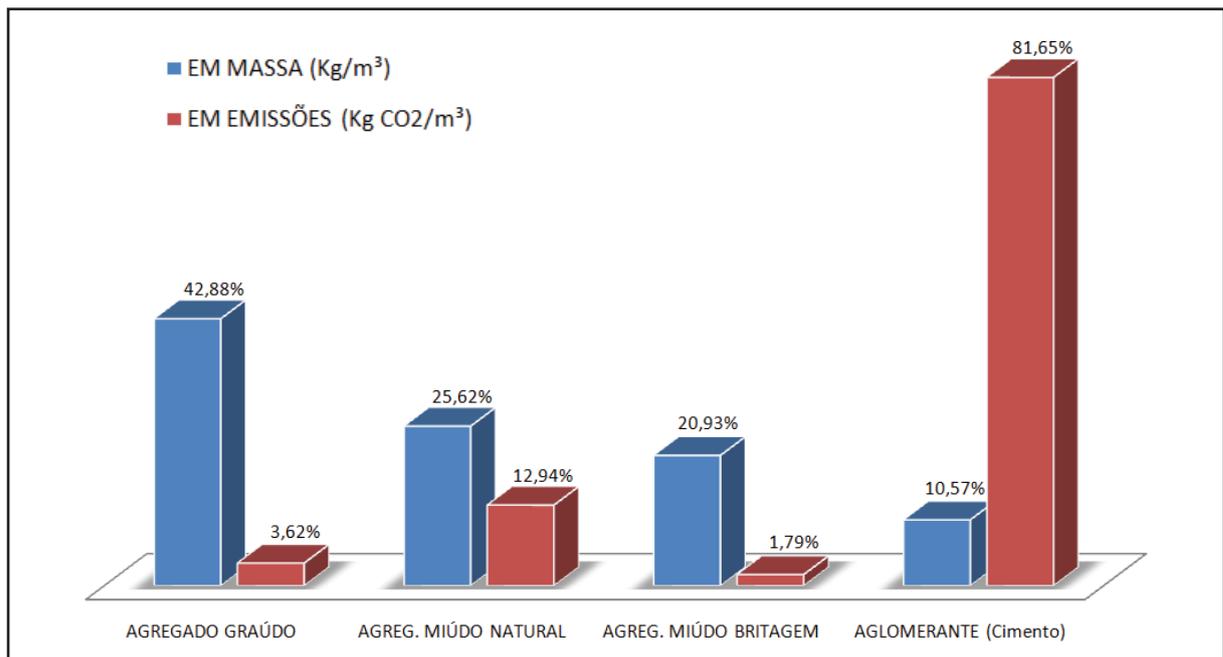
O concreto com resistência característica de 20 MPa, após os cálculos realizados na Tabela 14, apresenta a matéria prima aglomerante (cimento), mesmo sendo o menor contribuinte em massa, a que mais emite CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto, conforme Gráfico 7. Também se verifica que o agregado miúdo natural é a segunda matéria prima tanto em contribuição em massa como em emissões de CO₂.

Tabela 14 – Emissões de CO₂ por metro cúbico para o concreto com traço de 20 MPa.

MATÉRIA PRIMA	Quantidade Kg/m ³	Emissões Ext/Prod KgCO ₂ /Kg	Emissões Transporte KgCO ₂ /Kg	Emissões Totais KgCO ₂ / m ³
AGREGADO GRAÚDO	896,90	0,004007	0,000580	4,114080
AGREG. MIÚDO NATURAL	535,93	0,003550	0,023849	14,683946
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	437,65	0,004007	0,000636	2,032009
AGLOMERANTE (Cimento)	221,00	0,371000	0,048412	92,690052
Emissão Total (TRAÇO 20 Mpa)		113,520087 KgCO₂ / m³ concreto		

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 7 – Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 20 MPa.



Fonte: O autor (2015).

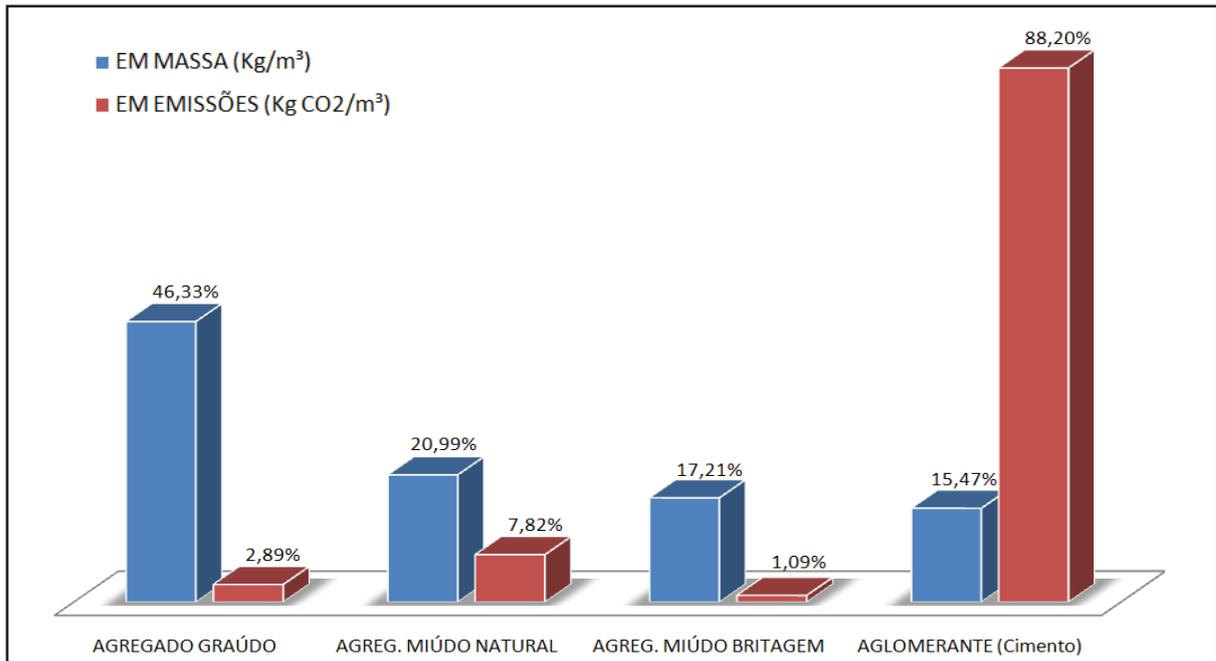
A partir da análise da contribuição de cada matéria prima na composição do concreto com resistência característica de 40 MPa, pode-se verificar, com o auxílio da Tabela 15, que novamente a matéria prima aglomerante (cimento) é o menor contribuinte em massa, é a que mais emite CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto, conforme Gráfico 8. Da mesma forma, verifica-se que o agregado miúdo natural apresenta-se em segundo, tanto em contribuição em massa como em emissões de CO₂.

Tabela 15 – Emissões de CO₂ por metro cúbico para concreto com traço de 40 MPa.

MATÉRIA PRIMA	Quantidade Kg/m ³	Emissões Ext/Prod KgCO ₂ /Kg	Emissões Transporte KgCO ₂ /Kg	Emissões Totais KgCO ₂ / m ³
AGREGADO GRAÚDO	997,61	0,004007	0,000580	4,576037
AGREG. MIÚDO NATURAL	451,92	0,003550	0,023849	12,382156
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	370,52	0,004007	0,000636	1,720324
AGLOMERANTE (Cimento)	333,00	0,371000	0,048412	139,664196
Emissão Total (TRAÇO 40 Mpa)		158,342714 KgCO₂ / m³ concreto		

Fonte: O autor (2015).

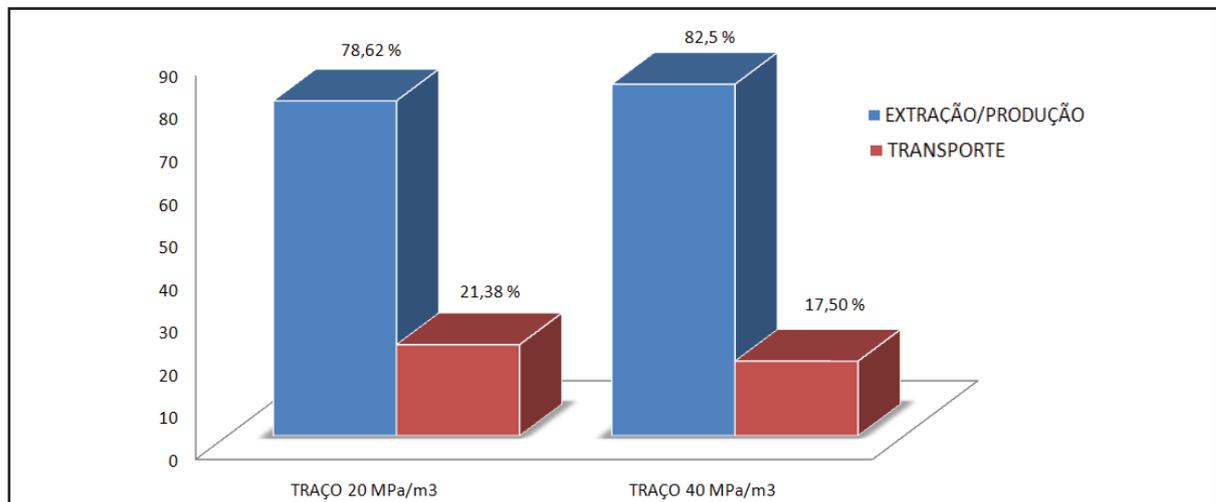
Gráfico 8 – Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço de 40 MPa.



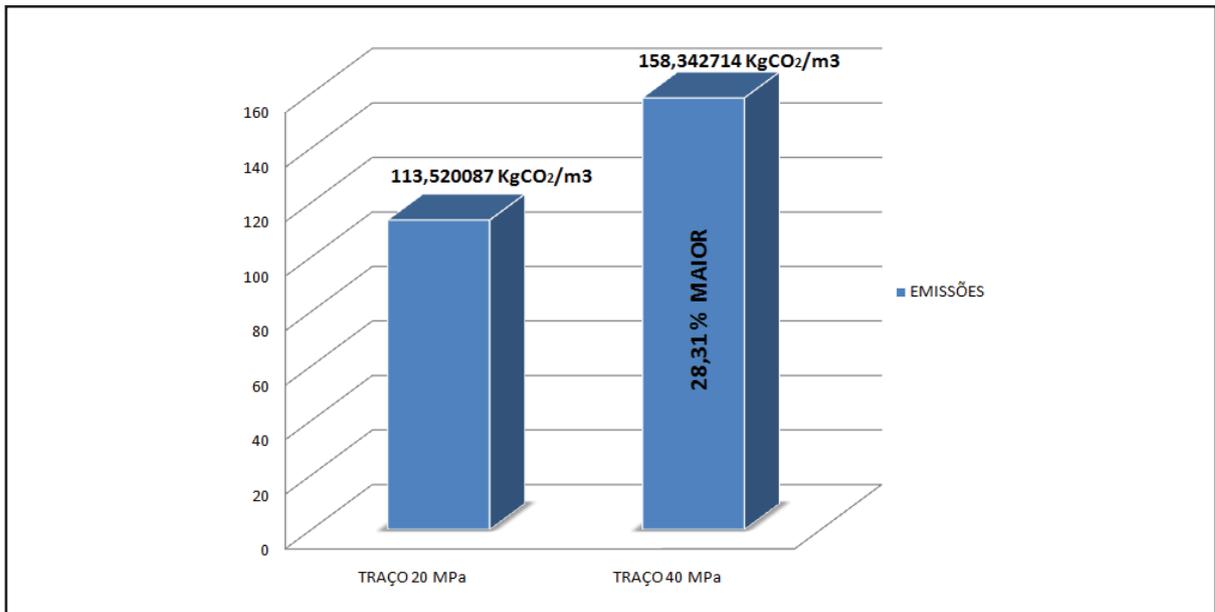
Fonte: O autor (2015).

Definidas as composições das matérias primas de um metro cúbico de concreto, apresentam-se, no Gráfico 9, os percentuais de contribuição de cada fase dos processos de extração/produção e transporte das mesmas. Consta-se que o percentual de contribuição do transporte é maior para a produção do concreto com traço de 20 MPa, o qual contribui com 21,38% das emissões totais de CO₂.

No Gráfico 10 podemos verificar que o concreto com traço de 40 MPa emite 28,31% mais CO₂ por metro cúbico produzido.

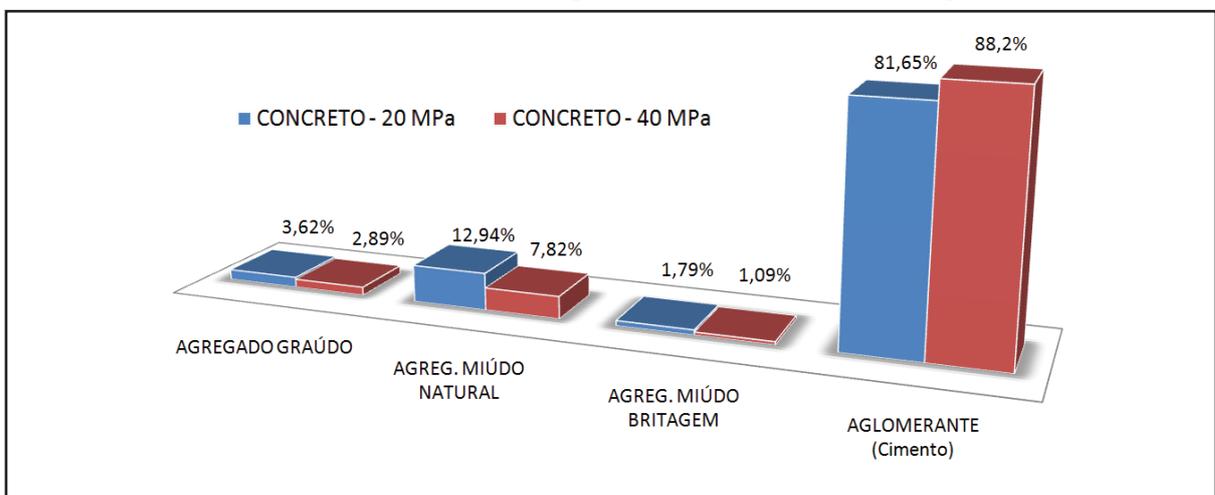
Gráfico 9 – Contribuições nas emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto.

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 10 – Totais de emissões de CO₂ para cada resistência por metro cúbico de concreto.

Fonte: O autor (2015).

Em última análise das emissões de CO₂ das matérias primas, apresenta-se o Gráfico 11, onde são comparadas as contribuições de cada material na produção de um metro cúbico de concreto, considerando-se os traços para as resistências características de 20 e 40 MPa. Observa-se que o concreto de 40 MPa tem uma emissão de 28,31% maior que o concreto de 20 MPa. Tal fato deve-se ao consumo de cimento por metro cúbico ser 33,63% maior no concreto de 40 MPa e o cimento ser o maior emissor de CO₂ das matérias primas constituintes do concreto.

Gráfico 11 – Contribuições das matérias primas nas emissões de CO₂ por metro cúbico.

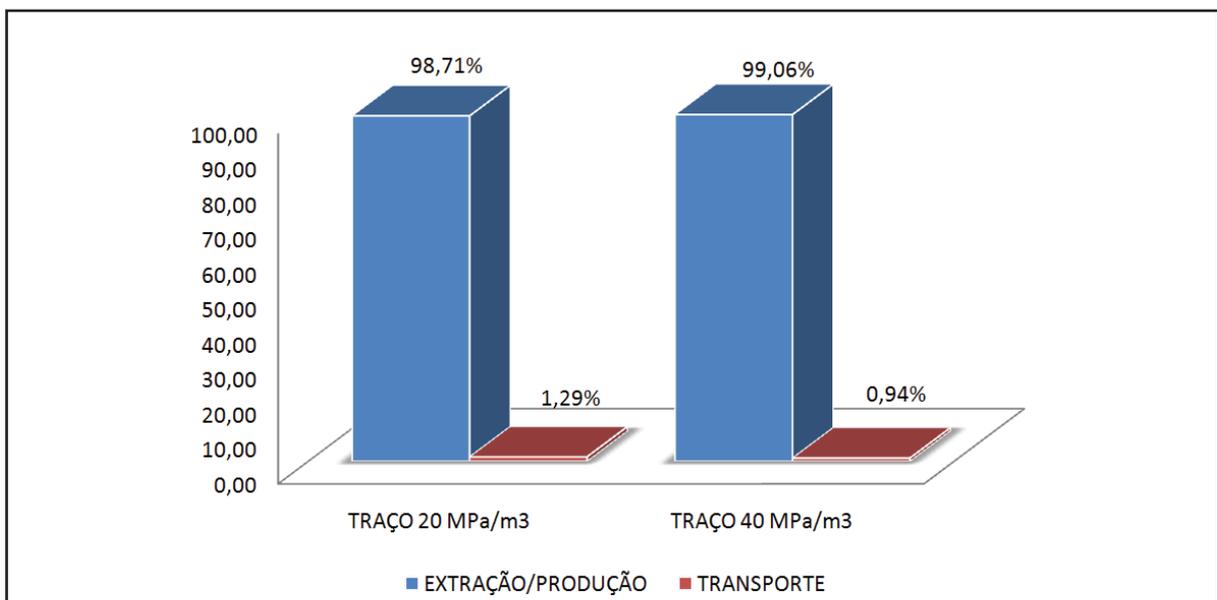
Fonte: O autor (2015).

Vê-se que uma parcela significativa das emissões de CO₂ advém do transporte das matérias primas, neste caso do agregado miúdo natural e aglomerante, os quais exigem um grande deslocamento de seu local de origem até a central dosadora de concreto. Para obtenção de parâmetros de comparação, para verificar o quanto estes transportes contribuem nas emissões totais, foi realizado um cálculo em que todas as matérias primas estejam disponíveis na cidade de Passo Fundo, tendo como distância de deslocamento em média dez quilômetros até o local de utilização.

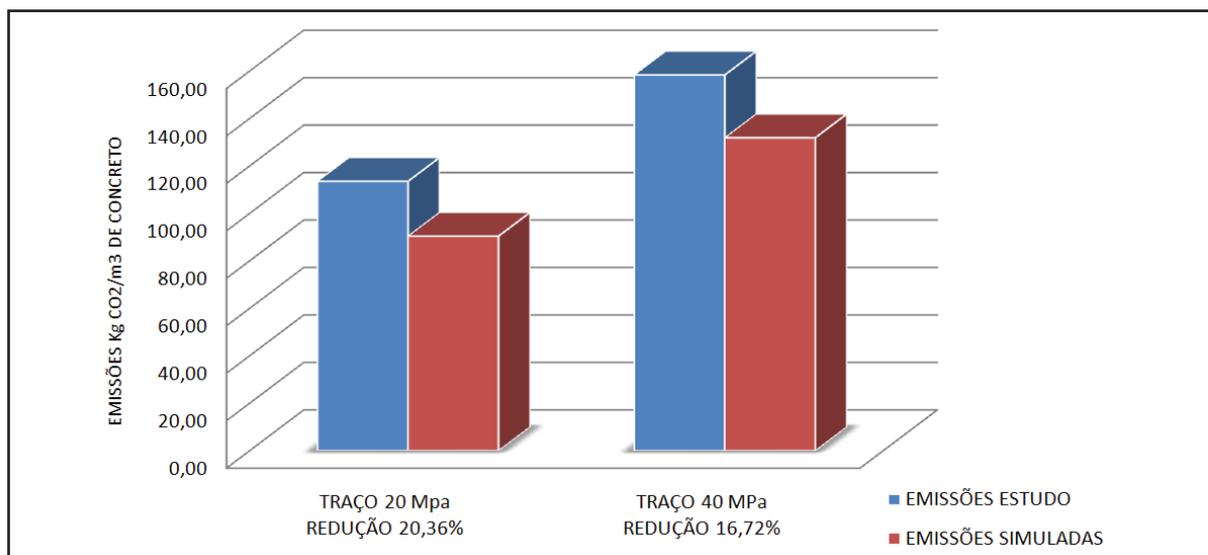
A partir deste novo cálculo, que compara o comportamento das emissões levando em conta estas mudanças de deslocamentos das matérias primas, gerou-se o Gráfico 12, que apresenta mudanças na diferença percentual da extração/produção com o transporte diminuindo em 20,09 % a contribuição do transporte das matérias primas no concreto de 20 MPa e 15,56% no de 40 MPa.

A partir do Gráfico 13, verifica-se uma redução de 20,36% para as emissões totais do concreto de 20 MPa e 16,72% para as emissões totais do concreto de 40 MPa, demonstrando que a parcela de longos deslocamentos das matérias primas tem influência de maneira significativa.

Gráfico 12 – Emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto, sem os grandes deslocamentos.



Fonte: O autor (2015).

Gráfico 13 – Comparações das emissões totais de CO₂ por metro cúbico de concreto.

Fonte: O autor (2015).

4.4 Consumos de energia elétrica das matérias primas utilizadas na produção de um metro cúbico de concreto

Da mesma forma que efetuado para emissões de CO₂, realizou-se a quantificação dos consumos de energia elétrica das matérias primas para a composição de um metro cúbico de concreto com traços de resistência característica de 20 e 40 MPa.

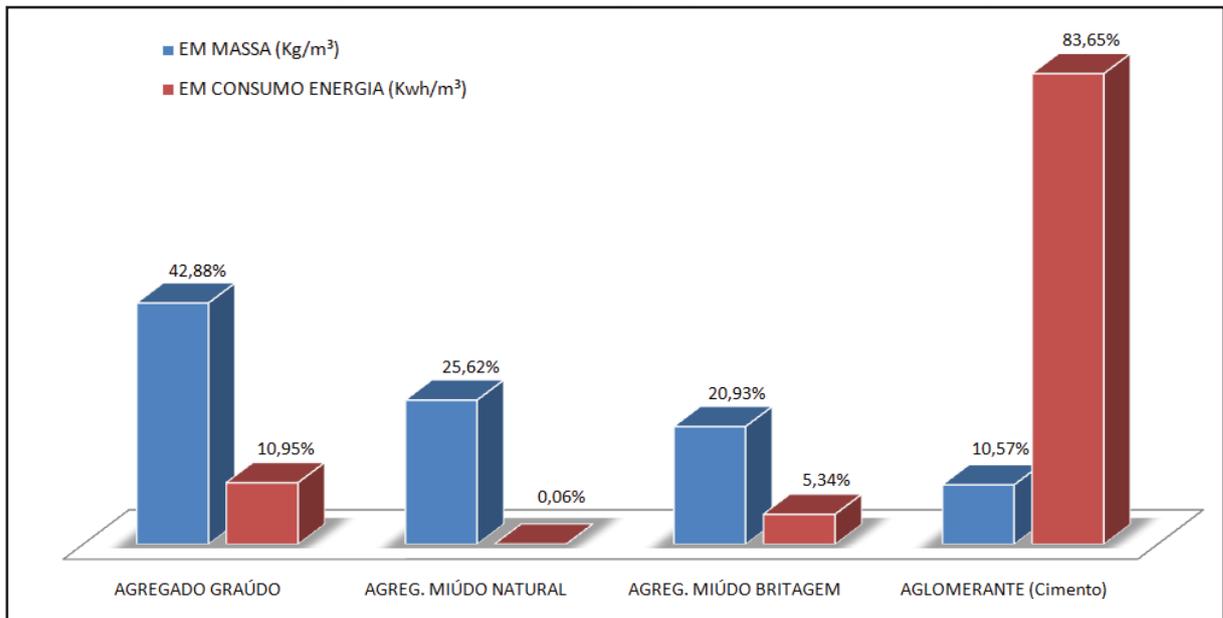
Nos cálculos para o traço de 20 MPa, realizados na Tabela 16, apresenta-se o aglomerante (cimento) como a menor contribuição em massa e maior contribuição em consumo de energia elétrica para a produção de um metro cúbico, conforme Gráfico 14. Já no segundo lugar em consumo de energia elétrica, tem-se o agregado graúdo que, em massa é o maior contribuinte.

Tabela 16 – Consumo de energia elétrica por metro cúbico, concreto com traço de 20 MPa.

MATÉRIA PRIMA	Quantidade	Consumos Energia
	Kg/m ³	Kwh/m ³ concreto
AGREGADO GRAÚDO	896,90	2,690700
AGREG. MIÚDO NATURAL	535,93	0,014470
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	437,65	1,312950
AGLOMERANTE (Cimento)	221,00	20,553000
Total Consumo Energia (TRAÇO 20 MPa)		24,571120 Kwh/m³ concreto

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 14 – Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço 20 MPa.



Fonte: O autor (2015).

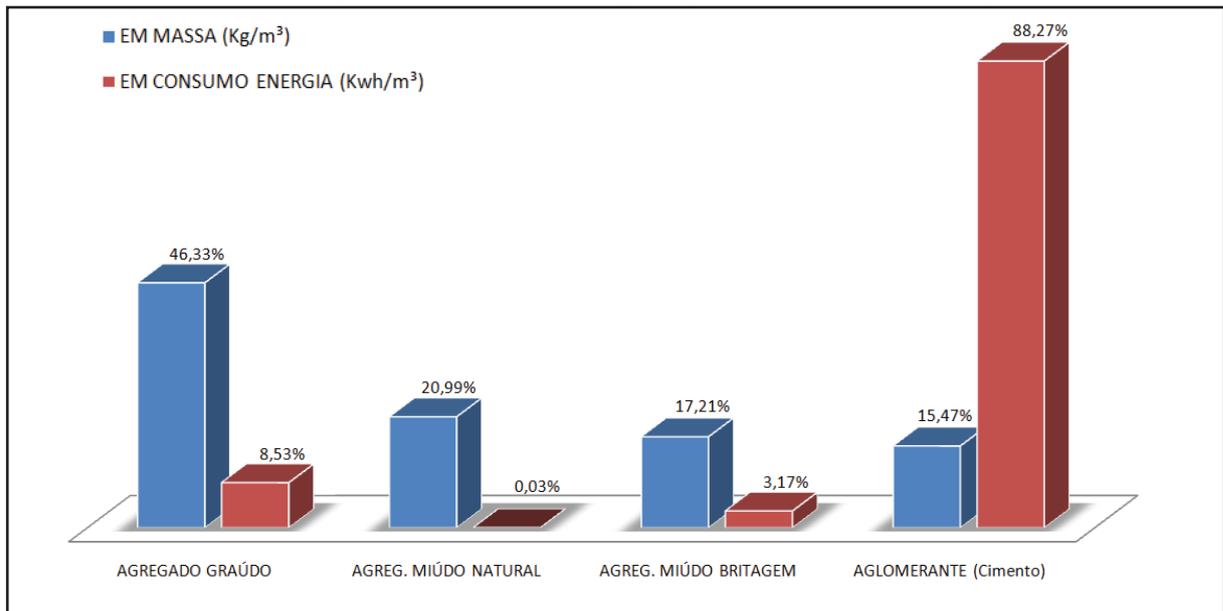
Na contribuição das matérias primas para o concreto de 40 MPa, calculadas na Tabela 17, observa-se o mesmo comportamento do traço de 20 MPa, onde o aglomerante (cimento) é também o menor contribuinte em massa e o maior consumidor de energia elétrica para a produção de um metro cúbico, conforme o Gráfico 15. Da mesma forma, o agregado graúdo mantém-se como segundo maior consumidor de energia elétrica e maior contribuinte em massa. Em relação ao consumo total, verifica-se que a resistência de 40 MPa consome 29,97% mais para a produção de um metro cúbico de concreto.

Tabela 17 – Consumo de energia elétrica por metro cúbico, concreto com traço de 40 MPa.

MATÉRIA PRIMA	Quantidade	Consumos Energias
	Kg/m ³	Kwh/m ³ concreto
AGREGADO GRAÚDO	997,61	2,992830
AGREG. MIÚDO NATURAL	451,92	0,012202
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	370,52	1,111560
AGLOMERANTE (Cimento)	333,00	30,969000
Total Consumo Energia (TRAÇO 40 MPa)		35,085592 Kwh/m³ concreto

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 15 – Comparativo das contribuições por metro cúbico do traço 40 MPa.

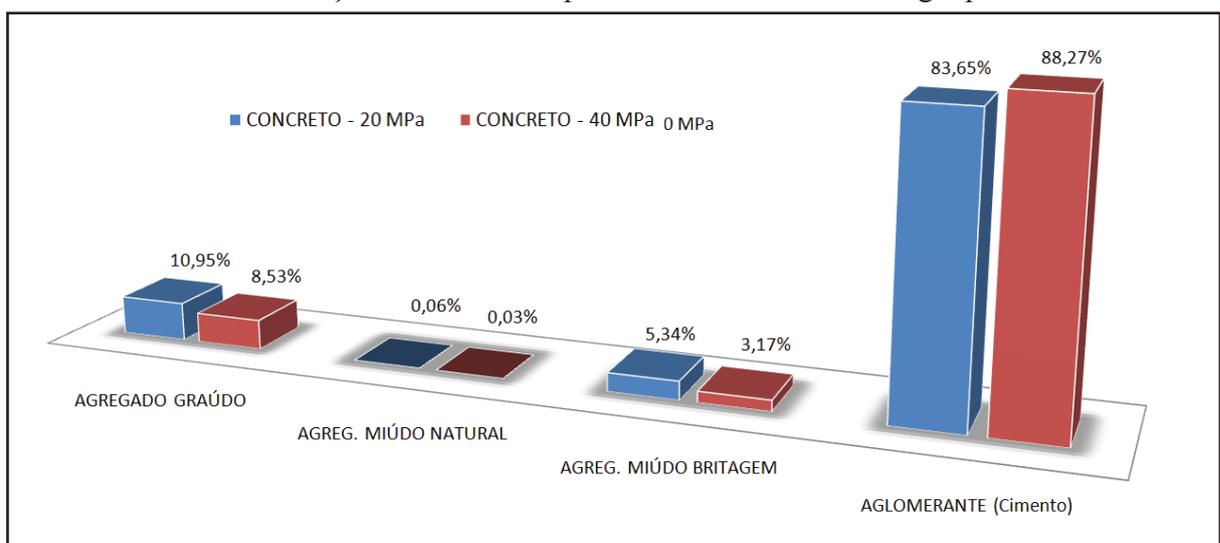


Fonte: O autor (2015).

No Gráfico 16, comparam-se as contribuições de cada matéria prima no consumo de energia elétrica na produção de um metro cúbico de concreto, considerando-se os traços para as resistências características de 20 e 40 MPa.

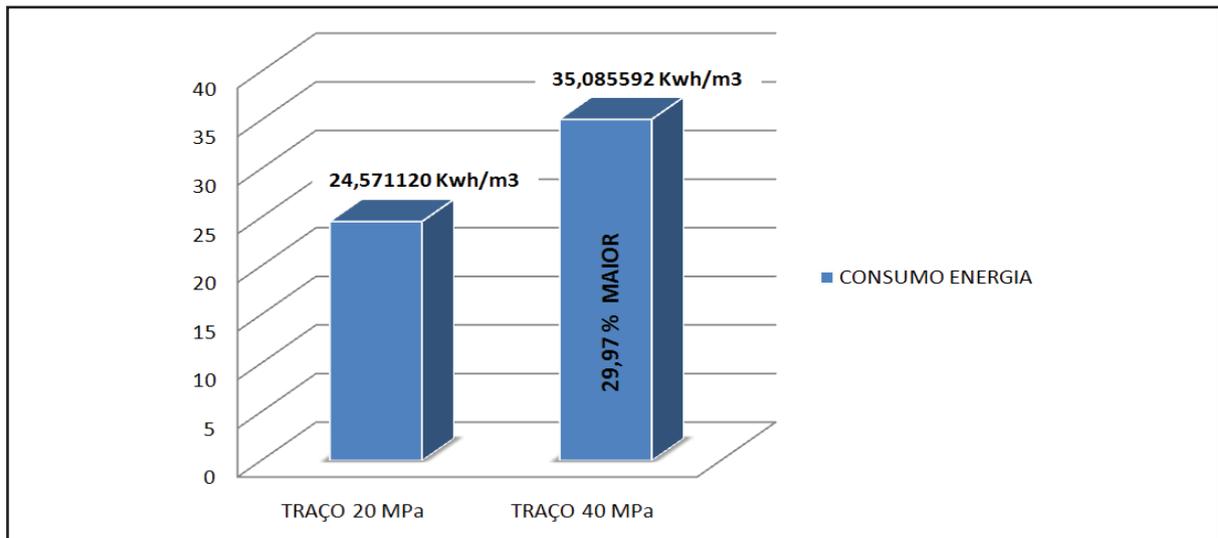
No Gráfico 17 podemos verificar que o concreto com traço de 40 MPa consome 29,97% mais energia elétrica por metro cúbico produzido.

Gráfico 16 – Contribuições das matérias primas no consumo de energia por metro cúbico.



Fonte: O autor (2015).

Gráfico 17 – Consumo de energia elétrica para cada resistência por metro cúbico de concreto.



Fonte: O autor (2015).

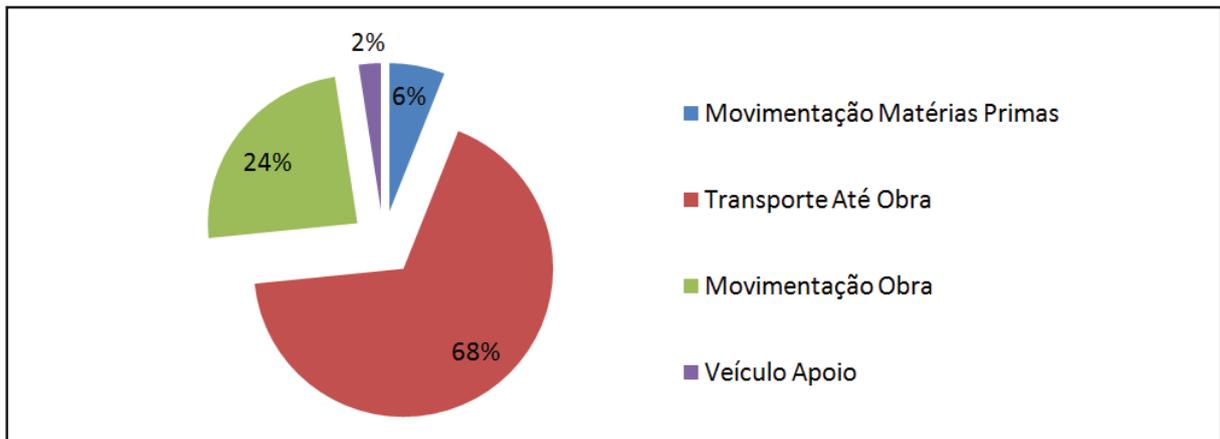
4.5 Emissões de CO₂ nos processos de produção e transporte de um metro cúbico de concreto pela central dosadora.

Além das emissões de CO₂ das matérias primas utilizadas no processo, também foram quantificadas as emissões por parte da central dosadora de concreto, sendo os valores correspondentes apresentados na Tabela 18. A partir do Gráfico 18, verifica-se que a maior parcela de contribuição das emissões totais de CO₂ destas etapas do processo advém do transporte do concreto até a obra, seguida pela movimentação horizontal ou vertical do mesmo na obra pelas bombas da central dosadora.

Tabela 18 – Emissões de CO₂ nos processos da central dosadora de concreto.

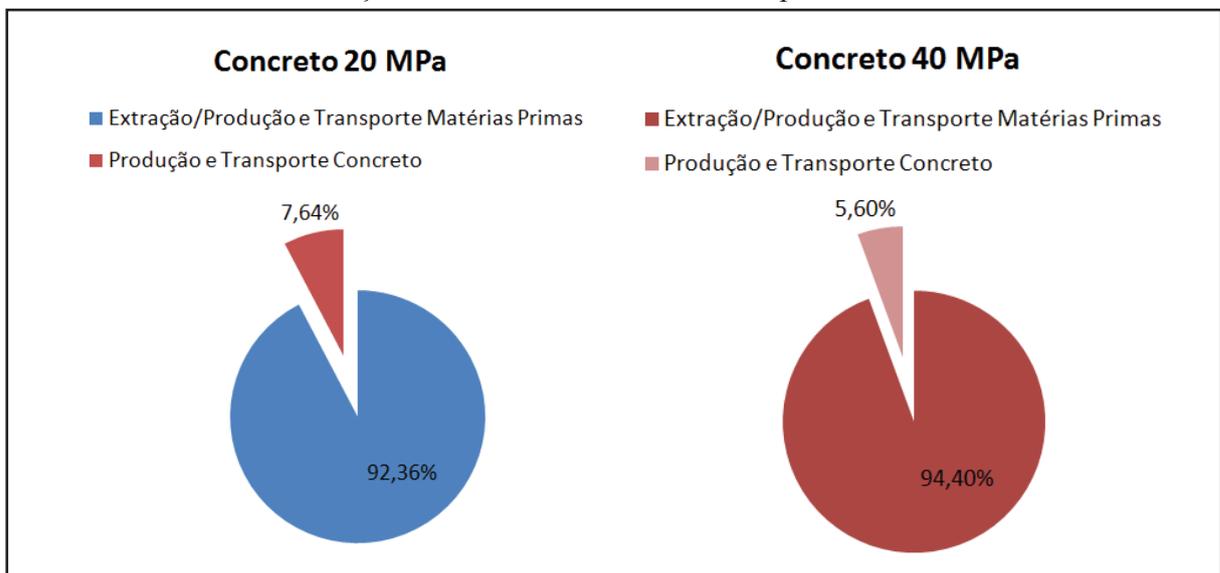
MOVIMENTAÇÃO	TRANSPORTE	MOVIMENTAÇÃO	VEÍCULO	EMISSÕES
MATÉRIAS PRIMAS	ATÉ A OBRA	NA OBRA	APOIO	TOTAIS
KgCO ₂ / m ³ concreto				
0,560910	6,330270	2,270350	0,226900	9,388430

Fonte: O autor (2015).

Gráfico 18 – Contribuições de emissões CO₂ nos processos da central dosadora de concreto.

Fonte: O autor (2015).

Quando comparadas as contribuições das emissões destas etapas do processo em conjunto com as etapas de produção e transporte das matérias primas do concreto, constatou-se, conforme Gráfico 19, que o concreto com 20 MPa de resistência característica tem uma contribuição maior nas emissões totais do que o concreto com resistência característica de 40 MPa.

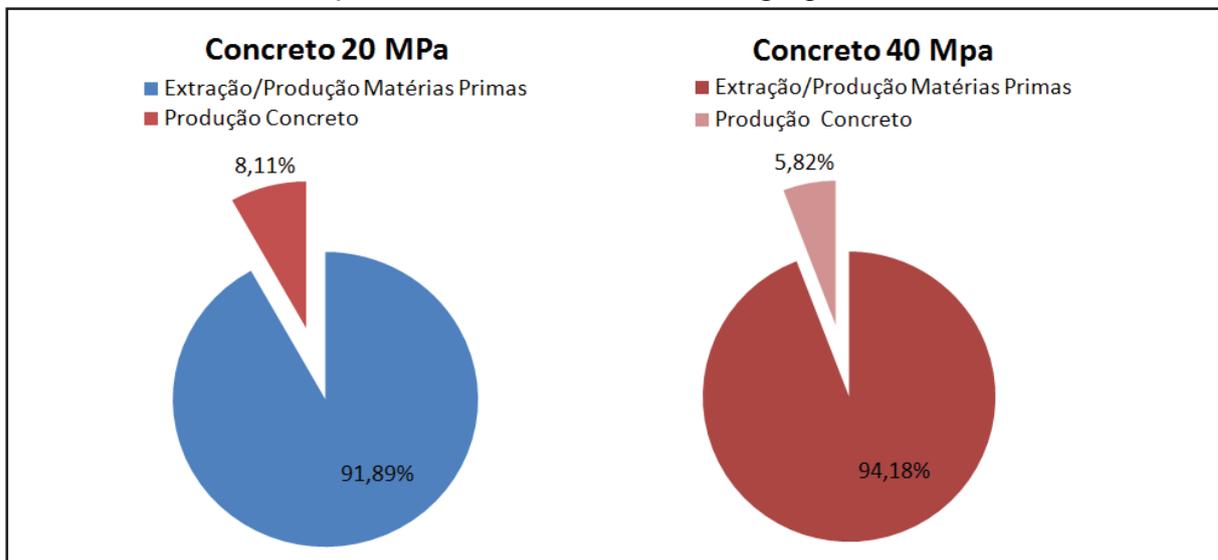
Gráfico 19 – Contribuições nas emissões totais de CO₂ por metro cúbico de concreto.

Fonte: O autor (2015).

4.6 Consumos de energia elétrica no processo de produção de um metro cúbico de concreto

Com o consumo de energia elétrica deste processo, calculado em 2,17 Kwh/m³, foi possível realizar a comparação da contribuição do mesmo com os processos de extração e produção das matérias primas. Verifica-se, pelo Gráfico 20, que as contribuições do consumo de energia elétrica em relação ao consumo total são muito semelhantes as obtidas para as emissões de CO₂.

Gráfico 20 – Contribuições nos consumos totais de energia por metro cúbico de concreto.



Fonte: O autor (2015).

5. DIMENSIONAMENTO DE VIGAS BI-APOIADAS, OTIMIZANDO O USO DAS MATÉRIAS PRIMAS, LEVANDO-SE EM CONTA O ENFOQUE ECONÔMICO E O ENFOQUE AMBIENTAL SEPARADAMENTE

A partir dos dados obtidos nos levantamentos em campo e nas revisões bibliográficas, foi realizado o dimensionamento de vigas bi-apoiadas, otimizando-se a utilização das matérias primas envolvidas na produção do concreto armado, levando-se em conta o custo, as emissões de CO₂ e o consumo de energia elétrica.

A otimização foi efetuada com a utilização de um software desenvolvido por Kripka (2003), para a análise de vigas em concreto armado, de forma isolada ou compondo uma grelha. O programa, desenvolvido em linguagem Fortran, associa a análise matricial pelo método dos deslocamentos com o método de otimização Simulated Annealing, o qual consiste num método heurístico, em analogia ao processo de recozimento de metais. A função objetivo é composta pelos custos de aço, concreto e formas, sendo essa última parcela desconsiderada no presente estudo. O custo mínimo é obtido a partir da determinação da altura ótima de cada elemento ou grupo de elementos, atendidas as restrições relativas aos estados limites últimos e de utilização, segundo prescrições da Norma Técnica ABNT NBR-6118 de 2007. Maiores detalhes sobre a formulação, bem como resultados obtidos a partir da aplicação do programa, podem ser obtidos, por exemplo, em Kripka (2003) e em Medeiros e Kripka (2013).

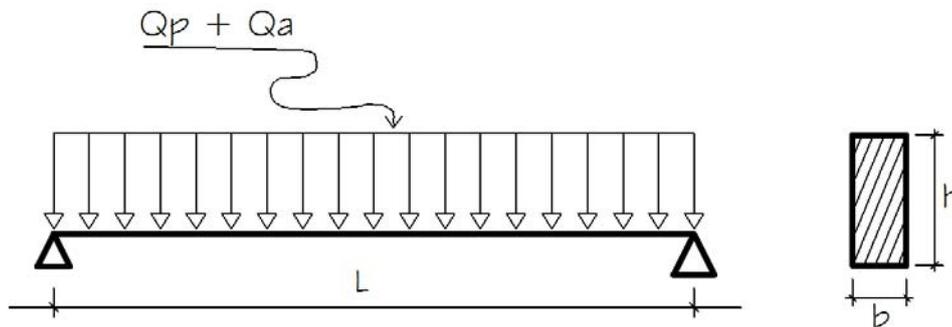
Os dados de entrada do programa são os valores do concreto e aço que podem ser em reais, emissões de CO₂ ou consumo de energia elétrica, as coordenadas geométricas da viga, a classe de agressividade ambiental, resistência característica do concreto, número de elementos, dimensões da viga, cargas permanentes e acidentais e flecha admissível.

Os resultados gerados pelo processamento apresentam a altura inicial e final da viga, o consumo de concreto e aço, bem com o valor final (em reais, emissão de CO₂ ou consumo de energia elétrica) para a confecção da mesma de maneira otimizada.

5.1 Características das vigas bi-apoiadas utilizadas nos dimensionamentos

Para a realização dos dimensionamentos otimizados das vigas bi-apoiadas, conforme Figura 21, foram adotados vãos livres (L) variando de 3 a 10 metros com incrementos de 0,5 metros para cada novo cálculo. A altura inicial de dimensionamento (h) para todas as vigas foi 1/10 de seu vão livre. A largura adotada das vigas (b) foi de 20 cm.

Figura 21 – Viga bi-apoiada utilizada nos dimensionamentos.



Fonte: O autor (2015).

As cargas permanentes (Q_p) utilizadas foram: de 9,5 kN/m e as cargas acidentais (Q_a) de 2,0 kN/m.

As resistências características do concreto utilizadas foram de 20 e 40 MPa.

5.2 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta os custos

Foram realizados os dimensionamentos das vigas bi-apoiadas, considerando-se os custos de mercado do concreto e aço na região de Passo Fundo no presente trabalho, conforme se apresenta na Tabela 19.

Estes custos foram obtidos a partir de levantamentos efetuados com diversas centrais dosadoras de concreto da região, durante o mês de janeiro de 2015, e com representantes comerciais das siderúrgicas na região, sendo considerados os valores médios.

Tabela 19 – Custos médios do concreto e aço na região de estudo.

Concreto (20 MPa)	285,00 R\$/m ³
Concreto (40 MPa)	365,00 R\$/m ³
Aço (CA 50)	3,00 R\$/Kg
Aço (CA 60)	3,27 R\$/Kg

Fonte: O autor (2015).

Após o processamento de todas as vigas propostas no estudo, foram elaboradas as Tabelas 20 e 21 com a compilação dos valores obtidos nos dimensionamentos otimizados.

Tabela 20 – Custo das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (R\$)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m3)
A	3,0	0,30	0,22	65,48	8,229	0,972	0,132
AA	3,5	0,35	0,26	87,81	10,569	1,296	0,182
B	4,0	0,40	0,28	112,27	14,429	1,573	0,224
BB	4,5	0,45	0,31	140,58	18,257	1,926	0,279
C	5,0	0,50	0,34	172,24	22,593	2,314	0,340
CC	5,5	0,55	0,39	208,81	25,728	2,863	0,429
D	6,0	0,60	0,41	246,46	31,858	3,262	0,492
DD	6,5	0,65	0,46	290,50	35,763	3,910	0,598
E	7,0	0,70	0,51	338,97	40,129	4,616	0,714
EE	7,5	0,75	0,52	385,30	48,849	5,032	0,780
F	8,0	0,80	0,56	439,51	55,130	5,738	0,896
FF	8,5	0,85	0,60	545,69	77,922	6,490	1,020
G	9,0	0,90	0,64	614,00	87,282	7,288	1,152
GG	9,5	0,95	0,67	683,86	98,272	8,022	1,273
H	10,0	1,00	0,72	763,81	107,968	9,023	1,440

Fonte: O autor (2015).

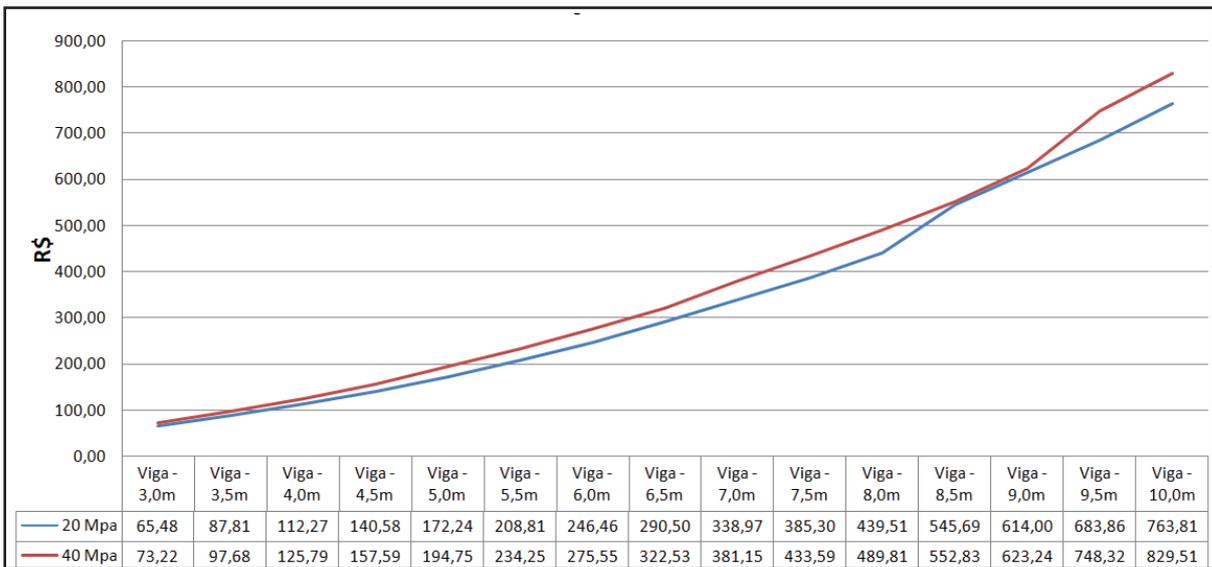
Tabela 21 – Custo das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (R\$)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m3)
A	3,0	0,30	0,19	73,22	9,035	1,377	0,114
AA	3,5	0,35	0,22	97,68	11,861	1,800	0,154
B	4,0	0,40	0,25	125,79	15,114	2,277	0,200
BB	4,5	0,45	0,28	157,59	18,807	2,810	0,252
C	5,0	0,50	0,32	194,75	22,181	3,489	0,320
CC	5,5	0,55	0,35	234,25	26,729	4,141	0,385
D	6,0	0,60	0,37	275,55	32,667	4,738	0,444
DD	6,5	0,65	0,40	322,53	38,259	5,490	0,520
E	7,0	0,70	0,46	381,15	41,412	6,684	0,644
EE	7,5	0,75	0,48	433,59	48,822	7,437	0,720
F	8,0	0,80	0,50	489,81	56,970	8,227	0,800
FF	8,5	0,85	0,53	552,83	64,618	9,209	0,901
G	9,0	0,90	0,57	623,24	71,567	10,412	1,026
GG	9,5	0,95	0,60	748,32	98,189	11,513	1,140
H	10,0	1,00	0,63	829,51	109,392	12,670	1,260

Fonte: O autor (2015).

No Gráfico 21, verifica-se o comportamento dos custos das vigas com as duas resistências características diferentes. As vigas com concreto de 20 MPa apresentam-se mais econômicas em todos os vãos, havendo somente uma proximidade de custos nas vigas com vãos de 8,5 m e 9,0 m. Esta mudança é devida ao início de exigência de armadura de pele para as vigas com resistência de 20 MPa, normalizando-se no vão de 9,5 m, onde inicia a exigência também para as vigas com concreto de 40 MPa.

Gráfico 21 – Comparativo de custos no dimensionamento otimizado das vigas.



Fonte: O autor (2015).

5.3 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta as emissões de CO₂

A otimização do dimensionamento das vigas em estudo, levando-se em conta as emissões de CO₂, foi realizada a partir dos dados obtidos durante a presente pesquisa e apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Emissões de CO₂ do concreto e aço na região de estudo.

Concreto (20 MPa)	122,908517 KgCO ₂ /m ³
Concreto (40 MPa)	167,731143 KgCO ₂ /m ³
Aço (CA 50)	1,046052 KgCO ₂ /Kg
Aço (CA 60)	1,046052 KgCO ₂ /Kg

Fonte: O autor (2015).

Verifica-se nas Tabelas 23 e 24 a compilação dos valores obtidos nos dimensionamentos otimizados.

Tabela 23 – Emissões de CO₂ das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (Kg CO ₂)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m ³)
A	3,0	0,30	0,21	25,618	8,748	0,937	0,126
AA	3,5	0,35	0,24	34,164	11,704	1,215	0,168
B	4,0	0,40	0,28	44,273	14,429	1,573	0,224
BB	4,5	0,45	0,31	55,407	18,257	1,926	0,279
C	5,0	0,50	0,34	67,846	22,593	2,314	0,340
CC	5,5	0,55	0,38	82,082	26,551	2,799	0,418
D	6,0	0,60	0,41	97,213	31,858	3,262	0,492
DD	6,5	0,65	0,45	114,315	36,706	3,835	0,585
E	7,0	0,70	0,49	132,924	42,009	4,454	0,686
EE	7,5	0,75	0,52	152,239	48,849	5,032	0,780
F	8,0	0,80	0,56	173,806	55,130	5,738	0,896
FF	8,5	0,85	0,60	213,676	77,922	6,490	1,020
G	9,0	0,90	0,63	239,207	88,239	7,184	1,134
GG	9,5	0,95	0,67	267,665	98,272	8,022	1,273
H	10,0	1,00	0,71	297,853	108,973	8,907	1,420

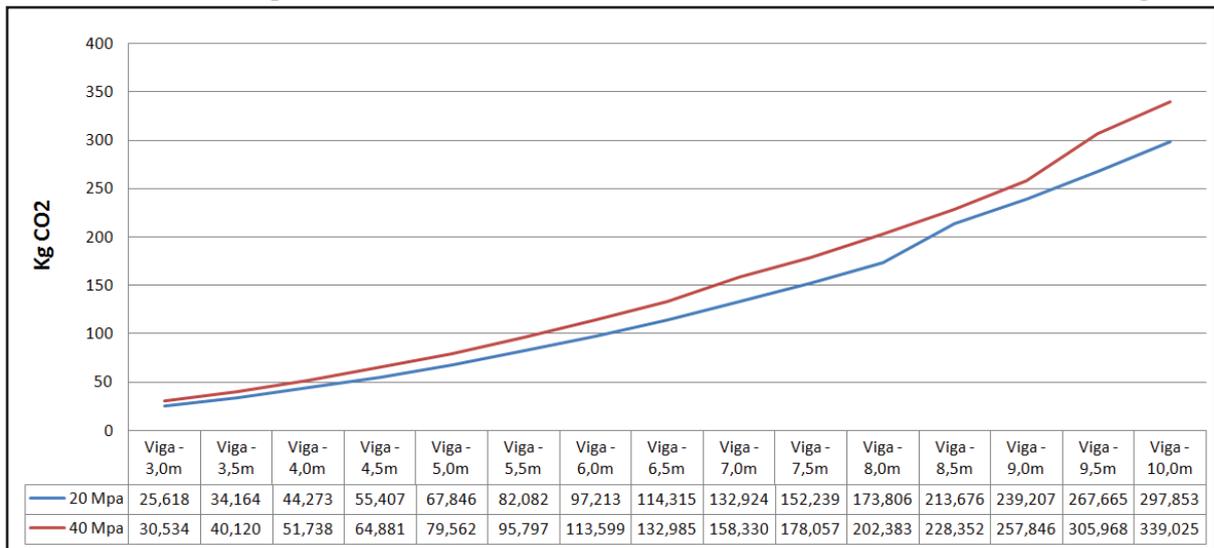
Fonte: O autor (2015).

Tabela 24 – Emissões de CO₂ das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (Kg CO ₂)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m ³)
A	3,0	0,30	0,20	30,534	8,516	1,432	0,120
AA	3,5	0,35	0,22	40,120	11,861	1,800	0,154
B	4,0	0,40	0,25	51,738	15,114	2,277	0,200
BB	4,5	0,45	0,28	64,881	18,807	2,810	0,252
C	5,0	0,50	0,31	79,562	22,955	3,397	0,310
CC	5,5	0,55	0,34	95,797	27,570	4,040	0,374
D	6,0	0,60	0,37	113,599	32,667	4,738	0,444
DD	6,5	0,65	0,40	132,985	38,259	5,490	0,520
E	7,0	0,70	0,46	158,330	41,412	6,684	0,644
EE	7,5	0,75	0,47	178,057	49,874	7,299	0,705
F	8,0	0,80	0,50	202,383	56,970	8,227	0,800
FF	8,5	0,85	0,53	228,352	64,618	9,209	0,901
G	9,0	0,90	0,57	257,846	71,567	10,412	1,026
GG	9,5	0,95	0,60	305,968	98,189	11,513	1,140
H	10,0	1,00	0,63	339,025	109,392	12,670	1,260

Fonte: O autor (2015).

Quando analisadas as emissões de CO₂ das vigas em estudo, conforme o Gráfico 22, verifica-se comportamentos similares com os dos custos, tendo todas as vigas com concreto de resistência de 20 MPa com menores emissões de CO₂ se comparadas com as vigas de resistência de 40 MPa. Igualmente, verifica-se uma aproximação dos valores de emissões nos vãos de 8,5m e 9 m devido ao início da utilização da armadura de pele para as vigas com concreto de 20 MPa.

Gráfico 22 – Comparativo de emissões de CO₂ no dimensionamento otimizado das vigas.

Fonte: O autor (2015).

5.4 Dimensionamentos otimizados das vigas levando-se em conta os consumos de energia elétrica

Os consumos de energia elétrica nos processos de extração e produção das matérias primas levantados e apresentados na Tabela 25, são os valores utilizados no dimensionamento otimizado das vigas em estudo.

Tabela 25 – Consumo de energia elétrica do concreto e aço na região de estudo.

Concreto (20 MPa)	26,741120 Kwh/m ³
Concreto (40 MPa)	37,255592 Kwh/m ³
Aço (CA 50)	0,482 Kwh/Kg
Aço (CA 60)	0,482 Kwh/Kg

Fonte: O autor (2015).

Com os dimensionamentos das vigas, foram obtidos os resultados que estão apresentados de maneira compilada nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 – Consumo de energia elétrica das vigas dimensionadas com concreto de 20 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (kWh)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m3)
A	3,0	0,30	0,24	7,930	7,423	1,041	0,144
AA	3,5	0,35	0,27	10,572	10,112	1,336	0,189
B	4,0	0,40	0,30	13,617	13,270	1,666	0,240
BB	4,5	0,45	0,34	17,063	16,342	2,082	0,306
C	5,0	0,50	0,37	20,926	20,400	2,487	0,370
CC	5,5	0,55	0,41	25,207	24,286	2,990	0,451
D	6,0	0,60	0,45	29,924	28,585	3,540	0,540
DD	6,5	0,65	0,48	35,066	34,072	4,060	0,624
E	7,0	0,70	0,51	40,660	40,129	4,616	0,714
EE	7,5	0,75	0,55	46,702	45,830	5,292	0,825
F	8,0	0,80	0,59	53,209	52,005	6,015	0,944
FF	8,5	0,85	0,60	67,962	77,922	6,490	1,020
G	9,0	0,90	0,63	76,318	88,239	7,184	1,134
GG	9,5	0,95	0,67	85,275	98,272	8,022	1,273
H	10,0	1,00	0,72	94,897	107,968	9,023	1,440

Fonte: O autor (2015).

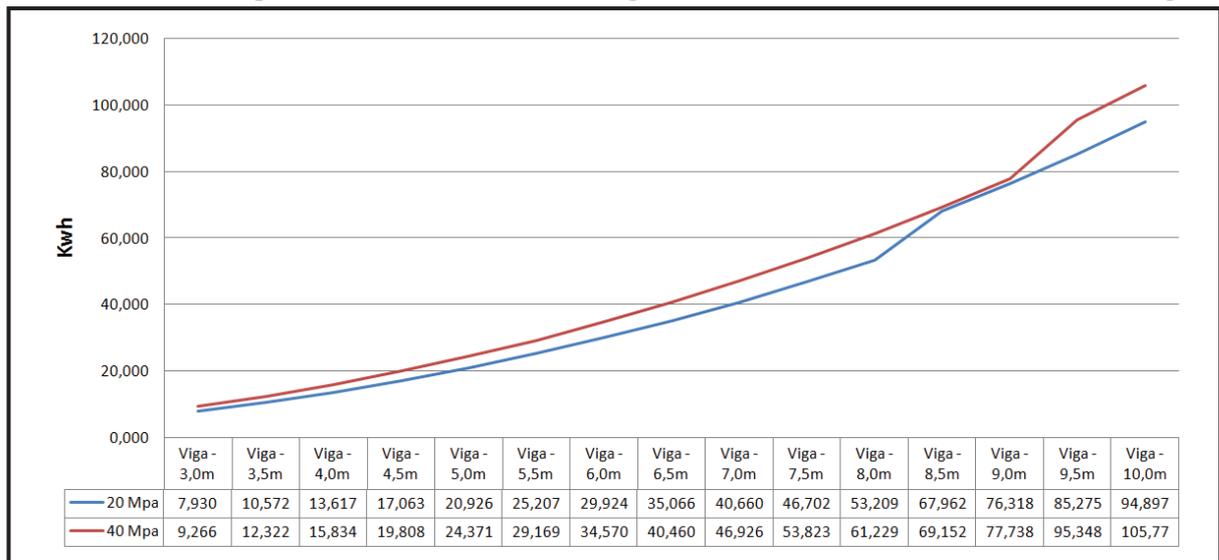
Tabela 27 – Consumo de energia elétrica das vigas dimensionadas com concreto de 40 MPa.

VIGA	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	RESULTADO FINAL (kWh)	ARMADURA LONGITUDINAL (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	CONCRETO (m3)
A	3,0	0,30	0,20	9,266	8,516	1,432	0,120
AA	3,5	0,35	0,22	12,322	11,861	1,800	0,154
B	4,0	0,40	0,25	15,834	15,114	2,277	0,200
BB	4,5	0,45	0,28	19,808	18,807	2,810	0,252
C	5,0	0,50	0,33	24,371	21,474	3,581	0,330
CC	5,5	0,55	0,34	29,169	27,570	4,040	0,374
D	6,0	0,60	0,37	34,570	32,667	4,738	0,444
DD	6,5	0,65	0,40	40,460	38,259	5,490	0,520
E	7,0	0,70	0,44	46,926	43,317	6,427	0,616
EE	7,5	0,75	0,47	53,823	49,874	7,299	0,705
F	8,0	0,80	0,50	61,229	56,970	8,227	0,800
FF	8,5	0,85	0,53	69,152	64,618	9,209	0,901
G	9,0	0,90	0,57	77,738	71,567	10,412	1,026
GG	9,5	0,95	0,60	95,348	98,189	11,513	1,140
H	10,0	1,00	0,63	105,776	109,392	12,670	1,260

Fonte: O autor (2015).

Analisando-se o Gráfico 23, constata-se que, em relação ao consumo de energia elétrica, as vigas com resistências de 20 MPa também apresentam menor consumo de energia em todos os vãos, havendo uma aproximação nos valores nos vãos de 8,5 m e 9,0 m devido ao início da utilização da armadura de pele nas vigas com concreto de 20 MPa, aproximação que já cessa no vão de 9,5 m pelo início da utilização de armadura de pele também nas vigas com concreto de resistência característica de 40 MPa.

Gráfico 23 – Comparativo de consumo de energia no dimensionamento otimizado das vigas.

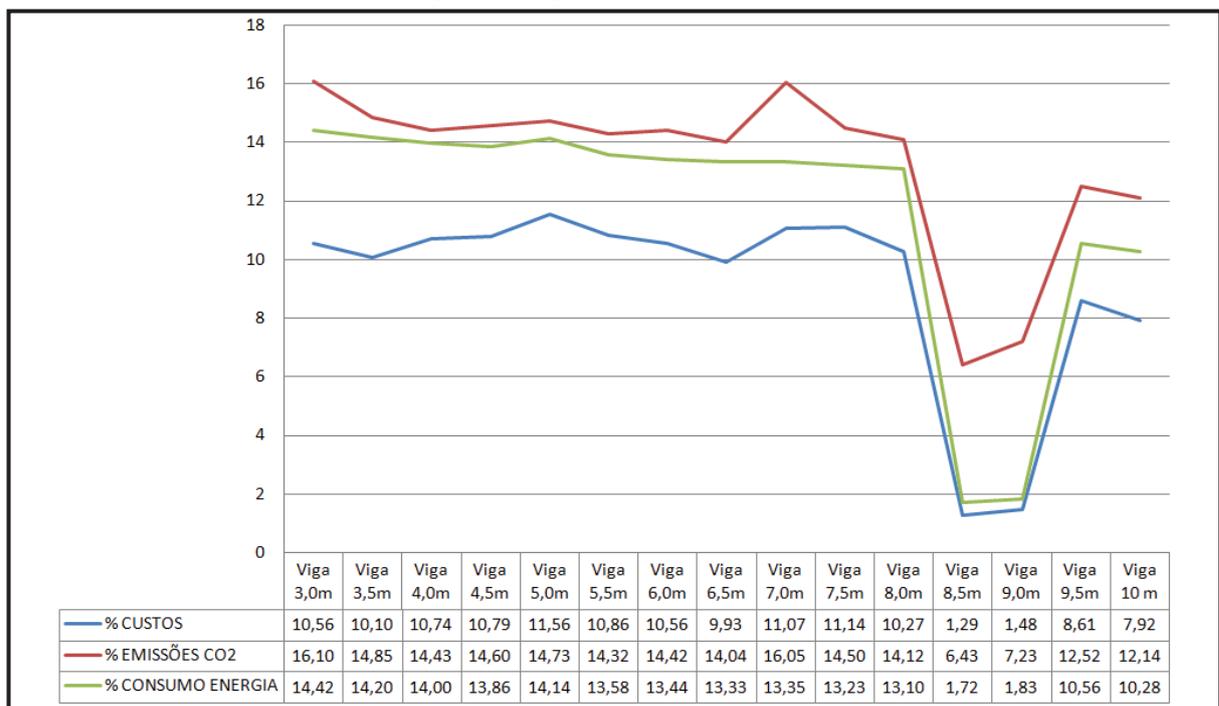


Fonte: O autor (2015).

5.5 Avaliações dos resultados obtidos

Após a conclusão dos dimensionamentos dos três estudos, foram comparados os resultados de cada um separadamente e verificado em porcentagem o quanto é melhor utilizar, conforme o Gráfico 24, a resistência de 20 MPa.

Gráfico 24 – Concreto 20 MPa, porcentagem melhor na utilização em relação ao de 40 MPa.

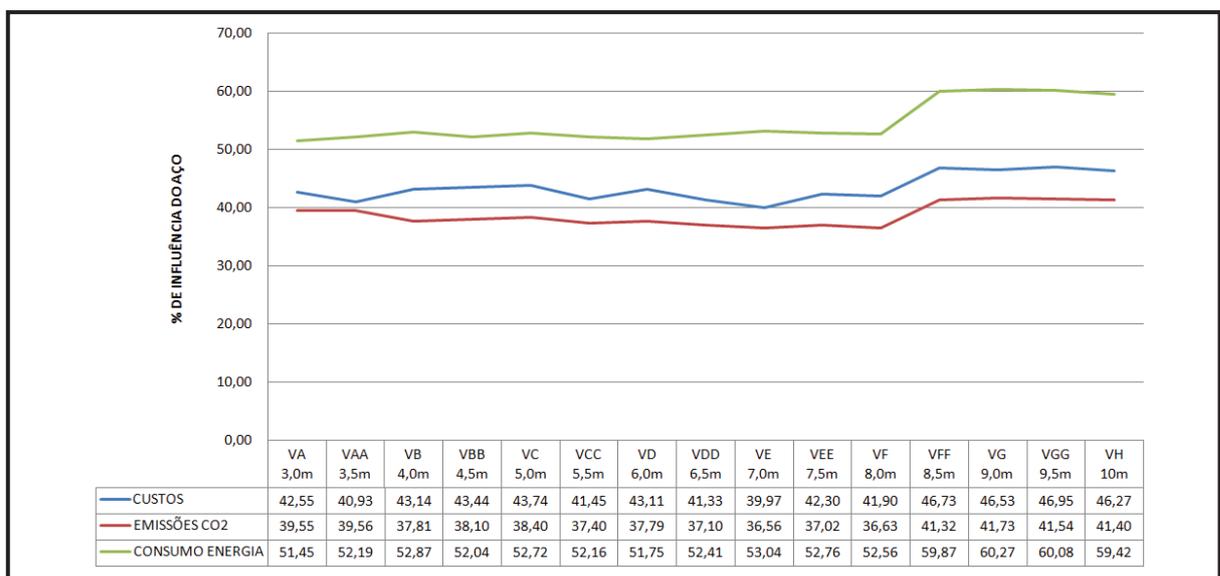


Fonte: O autor (2015).

As diferenças maiores apresentam-se para as emissões de CO₂, chegando a valores de até 16,05%, e as menores para os custos com valor de até 1,29% devido ao início da utilização de armaduras de pele nas vigas com resistência característica de 20 MPa.

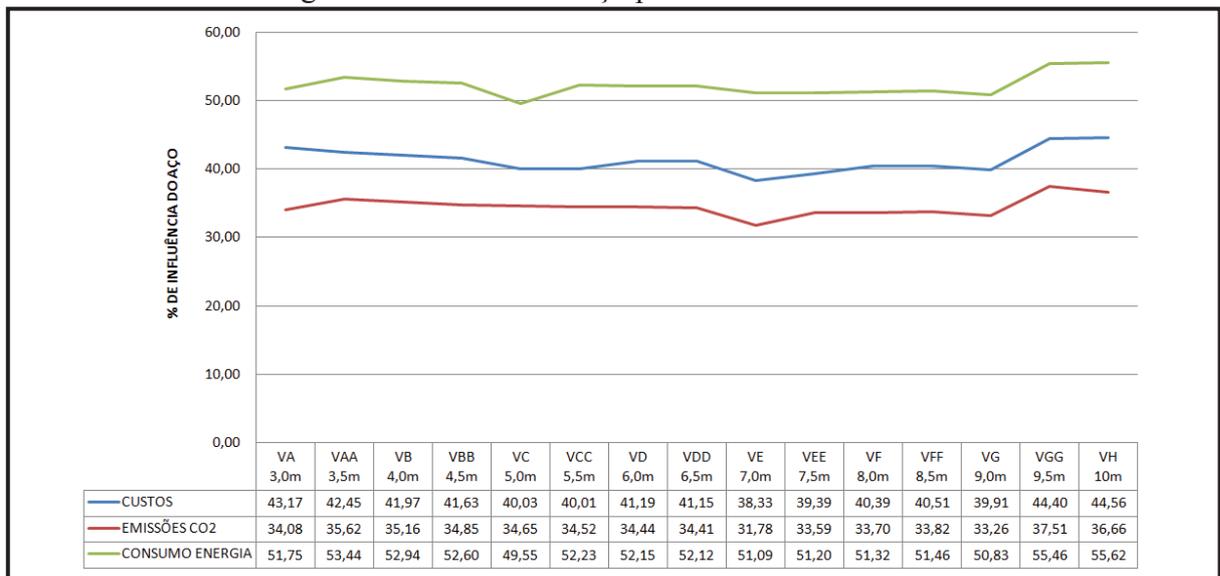
As influências do aço nos resultados obtidos podem ser verificadas nos Gráficos 25 e 26, os quais indicam participação média maior de 50% do consumo de energia elétrica, entre 40% e 50 % nos custos e menor de 40 % nas emissões de CO₂ para ambas as resistências características de concreto avaliadas.

Gráfico 25 – Porcentagens de influência do aço para o concreto com resistência de 20 MPa.



Fonte: O autor (2015).

Gráfico 26 – Porcentagens de influência do aço para o concreto com resistência de 40 MPa.



Fonte: O autor (2015).

6.0 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs o levantamento de parâmetros de emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica da produção e transporte das matérias primas e da produção e transporte do concreto até a obra, para serem utilizados quando da realização de cálculos de estruturas otimizadas de concreto armado, levando-se em conta, além de questões econômicas, questões ambientais.

Num primeiro momento, determinou-se a região de estudo, os responsáveis pela extração e produção, bem como pelos deslocamentos das matérias primas até a sua utilização. Em seguida, foram realizadas as visitas nos locais, coletas de dados e determinação dos valores relativos às emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica de cada quilo de matéria prima, tanto das fases de extração e produção como de transporte.

O aço, neste estudo, é o maior emissor de CO₂ e consumidor de energia elétrica das matérias primas, seguido pelo aglomerante (cimento). Em relação ao transporte das matérias primas, o agregado miúdo (areia natural) é o que possui a maior contribuição do transporte no seu total de emissões de CO₂.

Com as resistências características de estudo definidas em 20 e 40 MPa e as composições dos traços quantificadas, foram determinadas as emissões de CO₂ e os consumos de energia elétrica das matérias primas utilizadas na produção de um metro cúbico de concreto.

O concreto de 40 MPa é para cada metro cúbico produzido, 28,31% mais emissor de CO₂ do que o de 20 MPa, e quando verificada a influência do transporte nestas emissões, constata-se uma significativa contribuição nas duas resistências. O consumo de energia elétrica também é na resistência de 40 MPa 29,97% maior que na resistência de 20 MPa.

Da central dosadora de concreto foram quantificados os valores de emissão de CO₂ e consumo de energia para a produção e transporte de cada metro cúbico de concreto. Nestes processos as emissões e os consumos de energia elétrica corresponderam em média a 7% dos valores totais de um metro cúbico de concreto produzido.

A base de dados obtida foi utilizada para o dimensionamento de vigas conforme normatização, de modo otimizado, levando em conta questões econômicas e questões ambientais separadamente.

Depois de dimensionadas as vigas otimizando os custos, as emissões de CO₂ e o consumo de energia elétrica, pode-se concluir neste estudo que sempre é melhor utilizar, em todos os casos o concreto com resistência característica menor. Apesar da redução nas

dimensões da seção transversal das vigas otimizadas para o concreto de maior resistência, tanto o impacto quanto o custo se mantiveram superiores.

Ao final desta dissertação, sugerem-se também algumas recomendações para trabalhos futuros:

- a) Avaliar a composição dos traços de concreto, buscando maior utilização das matérias primas que possuam um menor custo ambiental final, como, por exemplo, substituição de uma parcela maior de agregado miúdo natural por agregado miúdo de britagem sem alterar características e trabalhabilidade.
- b) Utilizar os parâmetros ambientais obtidos neste estudo e dimensionar de forma otimizada pilares, para verificação do comportamento das resistências nestes elementos estruturais.
- c) Efetuar o levantamento das emissões das formas metálicas e/ou de madeira, com o objetivo de avaliar seu impacto nas dimensões otimizadas segundo os diferentes critérios.

REFERÊNCIAS

ACVBRASIL: Soluções computacionais. Disponível em: < <http://www.acvbrasil.com.br/>>. Acesso em: Outubro de 2013.

AGUIRRE, A. B.; HENNIES, W. T., Logística para agregados (brita e areia) em grandes centros urbanos, **Revista Escola de Minas**, v.63, n.4, pag. 639-643, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **ABCP:** básico sobre cimento. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acesso em: Outubro de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009. 21p.

ARAÚJO, J. M. M. **Impactos socioambientais da mineração de brita no município de Jaboatão dos Guararapes – estudo de caso da mineração USIBRITA.** 2011.102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral - PPGEMinas), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

BARBIERI, J. C.; CAJAZEIRA, J. E. R.; BRANCHINI, O. Cadeia de suprimentos e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. **O Papel**, v.70, n.9, p.52-72, 2009.

BASTOS, E. A. **Otimização de pilares retangulares em concreto armado submetidos à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos.** 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo.** 1997.184 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia: Engenharia Mineral), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013 – Aço.** Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8962> Acesso em 18 abr. 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013 – Areia para Construção.** Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8965> Acesso em 18 abr. 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013 – Brita e Cascalho.** Disponível em: < https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8969 > Acesso em 18 abr. 2014.

- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013 – Cimento**. Disponível em: < https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8975 > Acesso em 18 abr. 2014.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produção de Metais, Ferro e Aço**. Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produtos Minerais, Produção de Cimento**. Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília, DF, 2011.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia – Produto RT 68, Perfil do Cimento**. Brasília, DF, 2009.
- CARNEIRO, R. M. S.; QUEVEDO, S.; FLORES, A. R. B.; ULBRICHT, V. R.; VANZIN, T. Sustentabilidade: a especificação consciente dos materiais em arquitetura. In: SEGUNDO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 2009, São Paulo, **Anais II SBDS**, São Paulo, 2009, p.1-10.
- CARVALHO, M. B. M. **Impactos e Conflitos da Produção de Cimento no Distrito Federal**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável: Política e Gestão Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- CARVALHO, P. G. C. A. **Aplicações do programa SimaPro na avaliação do impacto ambiental causado na produção e exploração offshore de petróleo**. 2008. 76 f. Projeto final de curso (Engenharia Química: Petróleo e Gás Natural), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2008.
- Confederação Nacional da Indústria. Instituto Aço Brasil. **A Indústria do Aço no Brasil. Encontro da indústria para a sustentabilidade**. CNI, 2012.
- COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- GOOGLE MAPS, como chegar. Disponível em: < <https://maps.google.com.br/> > Acesso em 06 jan. 2015.
- ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Inclui bibliografia, referências bibliográficas e índice remissivo. ISBN v.1: 978-85-98576-18-3 v.2: 978-85-98576-19-0
- JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; LIMA, J. A. R. **Levantamento do estado da arte: Seleção de materiais**. Projeto Finep 2386/04, São Paulo, SP, 2007.

KALBUSCH, A. **Método para avaliação do impacto ambiental da substituição de equipamentos convencionais por equipamentos economizadores de água a partir da avaliação do ciclo de vida**. 2011. 242 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

KRIPKA, M. Otimização do Custo de Estruturas de Concreto Armado Analisadas pelo Modelo de Grelha. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2003, São Paulo. **Anais do V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, 2003.

LIBRELOTTO, D.; JALALI, S. Aplicação de uma ferramenta de análise do ciclo de vida em edificações residências – estudo de caso. **Revista de Engenharia Civil - Universidade de Minho** -, v.30, p.1-20, 2008.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 151 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia: Engenharia de construção civil e urbana), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEDEIROS, G. F. **Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado considerando custos econômicos e ambientais**, 2012. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Infraestrutura e meio ambiente), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MEDEIROS, Guilherme Fleith de ; KRIPKA, Moacir . Structural optimization and proposition of pre-sizing parameters for beams in reinforced concrete buildings. **Computers and Concrete, an International Journal**, v. 11, p. 253-270, 2013.

MILANEZ, B.; PORTO, M. F. S. Gestão ambiental e siderurgia: limites e desafios no contexto da globalização. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v.3, n.1, p.4-21, 2009.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEEs 3.0**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Engenharia civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PAYA, I. et al. Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.23, p.596-610, 2008.

Portal de Apoio ao Pequeno Produtor Mineral - PORMIN: **Legislação Mineral**. Disponível em: <http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/legislacao_mineral_resumida.pdf> Acesso em 18 abr. 2014.

RODRIGUES, C. R. B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. L. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2008, Rio de Janeiro, **Anais ENEGEP**, Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. p.1-15.

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SOUZA, A. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto – SP**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

TOLEDO Filho, R. Concreto verde – resíduos agrícolas podem diminuir o uso de cimento e reduzir a emissão de dióxido de carbono. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed.146, p.36-37, 2008.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Revista Produção**, v.23, n.2, pag. 436-447, 2013.

YEO, D.; GABBAI, R. D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. **Energy and Buildings**, v.43, p.2028-2033, 2011.