



TAINARA RAMOS DOS SANTOS

**PEGADA HÍDRICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND DE UMA INDÚSTRIA DO
CENTRO-OESTE MINEIRO**

LAVRAS – MG

2023

TAINARA RAMOS DOS SANTOS

**PEGADA HÍDRICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND DE UMA INDÚSTRIA DO CENTRO-
OESTE MINEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título
de Bacharel.

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

LAVRAS – MG
2023

TAINARA RAMOS DOS SANTOS

**PEGADA HÍDRICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND DE UMA INDÚSTRIA DO CENTRO-
OESTE MINEIRO**

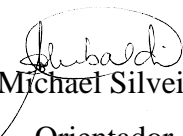
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título
de Bacharel.

APROVADA em 02 de março de 2023

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Me. Lorena Júlio Gonçalves UFLA

Engenheira Ambiental e Sanitarista Pâmela Rafanele França Pinto UFLA


Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

LAVRAS – MG

2023

*Dedico aos meus pais, Rogério e Kátia, por
todo amor e por sempre acreditarem em mim nessa
jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Jesus Cristo e a Nossa Senhora Aparecida, que em sua infinita bondade e misericórdia esteve comigo nos momentos mais difíceis da minha trajetória até o momento. Não me permitiram desistir e me amparou, tranquilizando meu coração e mente me dando forças para vencer mais essa etapa da minha vida.

Agradeço imensamente aos meus pais, Rogério e Kátia, por todo incentivo, apoio, compreensão, carinho e amor em todos os momentos e ainda mais nos momentos mais difíceis. Obrigada pelos ensinamentos e educação que me passaram, o que sou e tenho hoje, é graças a vocês que me proporcionaram e sempre estiveram presentes em minha vida.

Agradeço a toda a minha família, meus irmãos, Priscilla e Diego, que sempre me apoiaram. Aos meus avós por todo carinho e orações que me foram direcionadas. Aos meus amigos que fizeram parte de toda minha trajetória acadêmica que de uma maneira ou de outra contribuíram para minha evolução pessoal e profissional.

Ao professor Michael, por toda dedicação, paciência, compreensão e muita ajuda em todos os momentos que precisei. Principalmente pela orientação neste trabalho e no estágio. Obrigada pelos ensinamentos e confiança, fez com que o final da minha graduação fosse mais leve e sem pressão.

RESUMO

Questões relacionadas com a problemática ambiental aumentaram o interesse das empresas em como gerir um recurso natural e escasso, que é a água. Diante do aumento da pressão sobre este setor quanto ao uso racional dos recursos naturais, fez-se necessário a busca por ferramentas de gestão, a fim de contribuir com o uso da água de maneira mais racional e consciente. Uma das ferramentas utilizadas para elaborar essa gestão eficiente é a pegada hídrica, que é um indicador ambiental que avalia o consumo direto e indireto de água de um empreendimento e mostra as relações entre o consumo e o uso da água durante a produção de bens e serviços. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar a pegada hídrica do processo de fabricação de cimento Portland de uma indústria, localizada na mesorregião Oeste de Minas Gerais. Foram analisadas as pegadas hídricas de água azul e cinza, por se tratar de uma avaliação voltada à uma situação referente à escassez de água, a fim de avaliar a quantidade de água que a empresa consome e o potencial de causar estresse hídrico no corpo receptor de seus efluentes. Os resultados obtidos nesse trabalho permitiram uma compreensão mais ampla do consumo, sendo possível a identificação de todo fluxo de utilização e quantidade de água em seus processos, desde a captação até o descarte, e impactos causados pela atividade da empresa, além da identificação de possíveis falhas na gestão de recursos hídricos geridos pelo empreendimento e podendo obter respostas imediatas com possíveis falhas, como por exemplo, identificação de vazamentos. Foi observado que, nos processos produtivos que utilizam água, na indústria avaliada, há um alto índice de recirculação, que chegou a 94% no ano de 2021. Também pôde-se concluir que as atividades da empresa não contribuem com o nível de poluição no corpo receptor, de acordo com o levantamento do estudo. Devido a empresa não possuir medidor de vazão no fluxo de água que verte no rio, pôde-se recomendar a instalação do medidor de vazão.

Palavras-chave: Consumo de água. Gestão de Recursos Hídricos. Estresse hídrico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Geral	10
2.2	Específicos.....	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
3.1	Atividade de mineração de calcário.....	11
3.2	Ciclo da água em indústrias de mineração	14
3.3	Pegada hídrica: conceitos e aplicações.....	16
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1	Área estudada e definições gerais da avaliação de pegada hídrica.....	21
4.1.1	Descrição da bacia hidrográfica	25
4.2	Estrutura metodológica.....	27
4.2.1	Cálculo da pegada hídrica de água azul e da pegada hídrica de água cinza.....	27
4.2.2	Balanço Hídrico.....	31
4.2.3	Vazão e qualidade da água do Rio São Miguel	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	Balanço hídrico abrangente	36
5.2	Avaliação de impacto da pegada hídrica	39
5.2.1	Consumo direto	40
5.2.2	Consumo indireto	41
5.3	Índice de recirculação.....	44
6.	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da produção de bens de consumo e serviços causa impactos negativos em relação à água. Primeiramente, pela contaminação do corpo hídrico devido ao lançamento de efluentes proveniente das atividades industriais e agrícolas e, em segundo, devido ao aumento do volume de água que é captado para suprir as demandas, que interfere a disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas (KOTSUKA, 2013).

No contexto do setor mineral, sabe-se que a mineração é importante para o desenvolvimento de diversas indústrias, entretanto trata-se de uma atividade extrativa, que se utiliza de recursos naturais e possui intensa relação com o meio ambiente (BICHUETI; GOMES; KNEIPP; ROSA, 2015). Segundo a ANA e IBRAM (2015), pode-se afirmar que as indústrias de extração de minérios estão entre as maiores usuárias de água do Brasil. Suas atividades geram elevado impacto ambiental, o que evidencia a necessidade de adequação da gestão do uso da água neste setor.

A necessidade de práticas de gerenciamento desse recurso são fundamentais para mitigar os efeitos da crise hídrica que existe no Brasil. Com isso, surge a necessidade de gerir indicadores do uso desse recurso para aplicação de práticas que levem o uso mais eficiente e consciente, tanto no setor das indústrias, quanto no privado (MARINS, 2020).

Para o aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos nas indústrias, um instrumento que tem adquirido destaque é a Pegada Hídrica (MARINS, 2020). Desenvolvida a partir do conceito de água virtual, a pegada hídrica é um indicador de consumo direto e indireto de água, que considera para produzir bens e serviços (SILVA; GRZEBIELUCKAS; SANTOS; RIBEIRO, 2020), e procura mostrar as relações entre o consumo e seus impactos.

O conceito de Pegada Hídrica foi elaborado a partir dos volumes de água consumida pelas atividades e os volumes de poluição lançados pelos efluentes. É subdividida em pegada hídrica de água verde, pegada hídrica de água azul e pegada hídrica em água cinza. A pegada hídrica de água azul expressa a quantidade de água consumida no processo de origem superficial ou subterrânea, enquanto a verde é definida pela quantidade de água consumida pela planta através da água armazenada no solo devido a precipitação. Já apegada hídrica de água cinza, se refere a poluição, sendo definida como o volume de água necessário para diluir os poluentes presentes no efluente resultante do processo produtivo indicado (HOEKSTRA et al., 2011).

A contabilização da pegada hídrica fornece informações espaciais e temporais específicos sobre como a água é adequada para as várias necessidades de consumo, mensura o uso e forma uma base para avaliações de impactos ambientais, sociais e econômicos (HOEKSTRA et al., 2011).

Nesse sentido, observa-se que a gestão do uso da água é um importante fator nas indústrias minerais brasileiras, tendo em vista a elevada dependência desse recurso em suas atividades, bem como os impactos ambientais provocados em razão de suas operações (SILVA; LOPES; FERREIRA, 2020).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a pegada hídrica do processo de fabricação de cimento Portland de uma indústria, localizada na mesorregião Oeste de Minas Gerais.

2.2 Específicos

- Entender como as operações da indústria estudada interagem com os recursos hídricos, para subsidiar a elaboração de planos e medidas para sua gestão;
- Verificar a eficiência do uso de recursos hídricos, de forma a avaliar seus potenciais de estresse e poluição; e
- Identificar e propor medidas de melhorias para o monitoramento, controle e tomada de decisão quanto aos recursos hídricos da empresa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

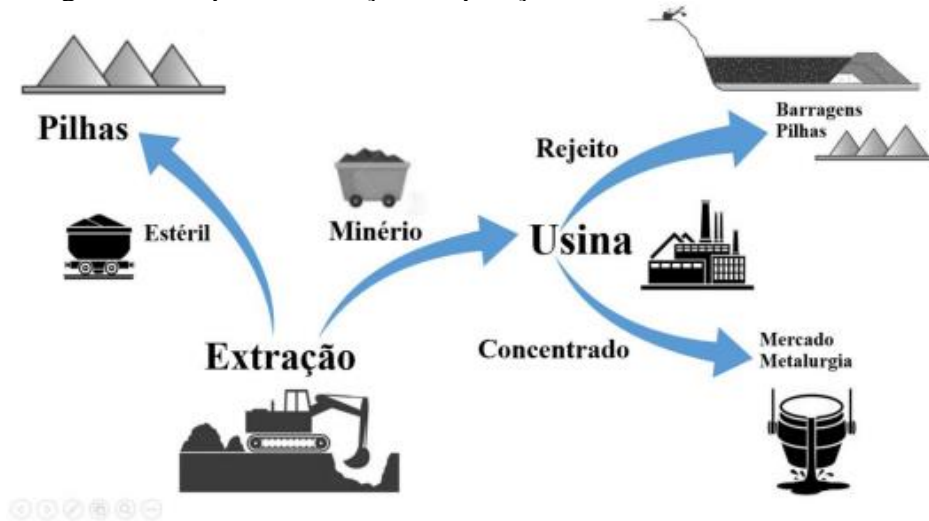
3.1 Atividade de mineração de calcário

A atividade de extração e beneficiamento de minérios é uma das mais antigas do mundo, e vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Com isso, o mercado tornou-se competitivo, com um aumento do destaque de assuntos relacionados à redução de custos operacionais. A implantação de melhorias em seus processos como, por exemplo, a busca por aproveitamento dos materiais que antes eram considerados rejeitos e descartados, agora passaram a ser comercializados como coprodutos provenientes do beneficiamento do produto principal (SILVA; LOPES; FERREIRA, 2020).

A mineração é uma atividade relevante quanto aos impactos ambientais, por ser responsável pela extração de matéria prima do solo, agredindo consideravelmente este (SILVA; LOPES; FERREIRA, 2020). Além disso, com o crescimento dos centros urbanos, as indústrias de extração estão cada vez mais próximas das comunidades, o que reflete na qualidade ambiental de seu entorno. O impacto negativo devido a operação, ocorre sobre o meio ambiente degradando solo, poluindo as águas, o ar e reduz a vegetação nativa e fauna. Porém, essa degradação não afeta somente ao meio ambiente, como também afeta a comunidade e os trabalhadores, por gerarem problemas a saúde humana, como complicações ao sistema respiratório e doenças pulmonares, por exemplo (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2016).

A extração de minérios pode ser feita por meio de lavra subterrânea ou lavra a céu aberto, cuja atividade gera basicamente dois tipos de resíduos: os estéreis e os rejeitos (BARBOSA, 2021). Segundo a NBR 13028 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017), o rejeito é todo resíduo resultante de todo processo de beneficiamento de minérios, durante este e mesmo após realizadas as operações, conforme apresentado na Figura 1. Os estéreis são os materiais gerados pela atividade de extração no decapeamento da mina, que ficam geralmente dispostos em pilhas. Estes são classificados como materiais de baixo, ou mesmo nenhum, valor econômico associado (SANTOS, 2014).

Figura 1 - Etapas da extração, disposição e beneficiamento do minério

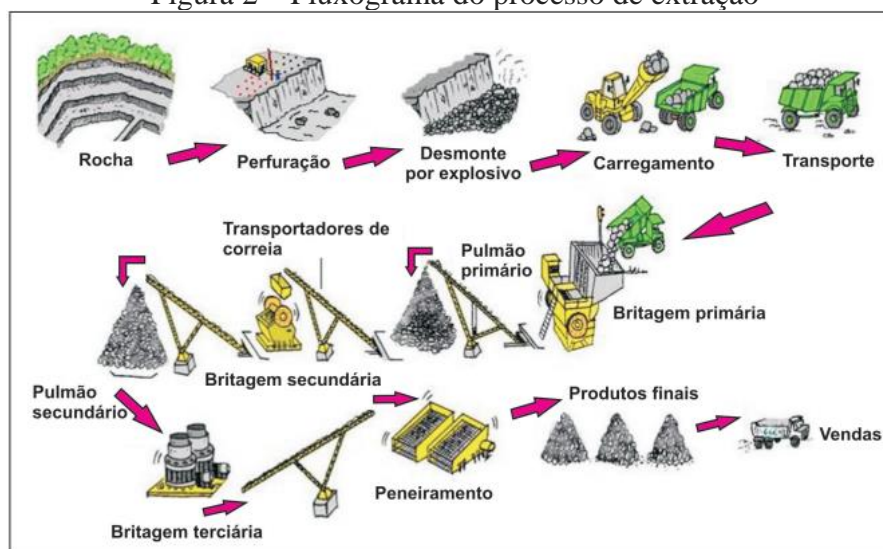


Fonte: Moraes (2022)

Na extração de alguns minérios como, por exemplo, as lavras de mineração de extração de ferro, geram-se elevados volume de rejeitos e, com isso, é necessário a construção de barragens para sua contenção (Figura 1). Por outro lado, as lavras de extração de calcário produzem apenas resíduos estéreis que passam pelo processo de redução de granulometria, e então são produzidos agregados britados para a construção civil (BARBOSA, 2021). O calcário no Brasil apresenta uma grande variedade de usos, sendo também utilizado na atividade agrícola como corretivo do solo, matéria prima para a fabricação de cal e cimento, e um dos ingredientes para a produção nas indústrias de siderúrgica, de papel, de vidro, entre outras (MME,2010).

As minas de extração de calcário são encontradas, em sua maior parte, como lavra a céu aberto. As principais etapas que ocorrem na lavra, incluem: remoção do capeamento, perfuração, desmonte por explosivos e transporte do material extraído até a próxima etapa de processamento, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo de extração



Fonte: Iramina; Tachibana; Silva; Eston (2009)

A seleção dos equipamentos, para a próxima fase do processo, varia com a particularidade de cada operação, a capacidade de produção e, por fim a finalidade da extração. A próxima etapa é o circuito de britagem, onde são encontradas algumas características de funcionamento dos britadores. O calcário possui baixa resistência à britagem e à moagem, com isso, a redução em seu tamanho é tida como fácil. A britagem é executada em circuitos de vários estágios que inclui combinações de britadores de mandíbulas ou giratórios em grandes operações, além de britadores cônicos secundários e terciários (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

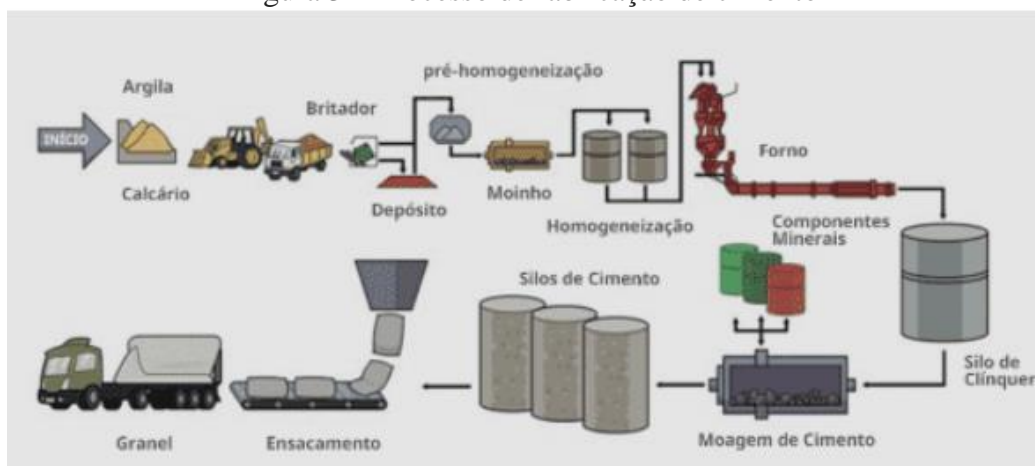
As rochas de calcário passam por tratamentos em diferentes etapas. Para produtos que não requerem controles específicos, o calcário passa pelo processo de britagem e peneiramento para adquirir a granulometria desejada da rocha. Para produtos que necessitam de mais etapas, como por exemplo, para a produção do cimento Portland, o calcário passa pelos britadores primários e secundários, é transportado via correias para a classificação e são direcionados para a moagem em moinhos de rolos ou tubulares com bolas, obtendo a granulometria mais fina e, por fim, passa por fornos rotativos, que chegam a altas temperaturas, cerca de 1450 °C, para a calcinação do calcário (MME, 2010).

Antes de ser direcionado para os fornos rotativos, o calcário passa por uma mistura com argila e conseqüentemente, é calcinado nos fornos. O resultado é um produto intermediário chamado de clínquer, ao qual é adicionado produtos como a escória de alto forno. É utilizado este produto na mistura, devido a suas propriedades fundamentais

físicas e químicas. Sendo um subproduto proveniente dos fundentes adicionados, sua qualidade está diretamente ligada à qualidade do tipo de combustível utilizado, ao minério de ferro, o ativador utilizado e a viscosidade do produto (KELES, 2011).

Ainda segundo o mesmo autor, as escórias de alto forno podem reduzir até 5% a emissão de CO₂ que é produzido na fabricação de cimento e, com isso, há um aumento significativo na procura desse produto nas indústrias cimenteiras. A relação da adição dos aditivos na mistura é definida pelo tipo de cimento que será produzido, e cada um possui suas particularidades. A última etapa do processo de produção é a passagem desta mistura no moinho até obter um pó fino, que é o cimento. Um fluxograma deste processo pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Processo de fabricação de cimento



Fonte: Silva (2020)

3.2 Ciclo da água em indústrias de mineração

Os impactos negativos gerados pelos empreendimentos de mineração têm passado por melhores e mais eficientes controles ambientais, o que inclui medidas de mitigação e compensação ambiental. A relação que existe entre o desempenho consciente de uma empresa e a preservação dos recursos hídricos, sugere a necessidade de uma ampla discussão sobre a responsabilidade corporativa em relação às águas (FIGUEIREDO, 2021).

As atividades produtivas industriais necessitam ter acesso a volumes de águas maiores do que para o consumo humano. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2015), as atividades das indústrias utilizam 21% da totalidade de água

consumida no Brasil e dentro desse percentual, está o consumo da mineração. A demanda pelos recursos hídricos para a mineração no estado de Minas Gerais é relativamente baixa, quando comparada com o uso total das águas no estado, sendo a captação, principalmente, proveniente de cursos d'água superficiais. Tal volume representa 11% da demanda total estimada para Minas Gerais, estado que possui o maior número de mineradoras no país.

No que se diz a respeito à conscientização, quando se trata de questões relacionadas à água, o desafio é imenso. A mineração é de extrema importância para a economia brasileira, entretanto, sua atividade utiliza-se de recursos naturais que possui intensa relação com meio ambiente. Em termos específicos relacionados ao ciclo da água em uma indústria de mineração, é possível mapear a quantidade de água consumida tanto no processo de produção quanto na utilização de consumo humano na área industrial, e às descargas residuais nos corpos hídricos (BICHUETI; GOMES; KNEIPP; ROSA, 2015).

A realização de uma boa gestão do uso da água nas indústrias de mineração é de grande importância, tendo em vista a dependência desse recurso em suas atividades, bem como os impactos ambientais gerados devido as suas operações. Um impacto negativo que causa grande preocupação, é o rebaixamento do nível dos lençóis freáticos devido a atividades realizadas nas operações, como o avanço da lavra que diminui as cotas altimétricas inferiores (FIGUEIREDO, 2021). Aspecto importante é que a preocupação com o meio ambiente e recursos naturais nas indústrias, leva ao desenvolvimento de políticas internas de uso consciente dos recursos naturais, como a gestão das águas. Existem alguns fatores que justificam a diminuição do uso da água, como, por exemplo, interesses próprios, pois existem altos custos e obrigações para utilização deste recurso e a reputação da empresa que se diz preocupada frente a uma sociedade mais atenta aos impactos ambientais (BICHUETI; GOMES; KNEIPP; ROSA, 2015).

A mineração não utiliza água tratada fornecida pelas companhias de saneamento, portanto, faz-se necessária a solicitação do direito de seu uso, sendo a captação superficial, com reservatórios de barragens ou subterrânea, pelo instrumento legal chamado outorga. A outorga é um instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelecida na Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (BRASÍLIA, 1997), que avalia a condição da bacia hidrográfica e analisa a petição de uso do volume/vazão solicitada pelo empreendimento, assim o órgão responsável avalia o processo para que se autorize ou não o uso (DOMINGUES; BOSON; ALÍPAZ, 2006).

A demanda no consumo de água na mineração, pode ser aplicada ao uso para aspersão de vias, para controle de emissão de materiais particulados, no desmonte hidráulico, na lavagem dos equipamentos e no transporte de materiais (DOMINGUES; BOSON; ALÍPAZ, 2006). O uso para o beneficiamento do calcário é relativamente baixo, pois não há parcela significativa utilizada no ciclo da atividade de produção de cimento, pois o processo permite que a água que entra no sistema retorne em circuitos fechados, onde a perda é mínima, e não há existência de geração de efluentes (MME, 2010).

Segundo IBRAM (2015), é elevado o índice de recirculação da água para diferentes tipos de atividade de extração de minério, sendo 90% no minério de ferro, 81% no ouro, 95% no carvão mineral, 100% em areia quartzosa industrial, calcário calcítico e dolomítico, entre outros. Portanto, a demanda pelo consumo de água em ambos os casos, e os efeitos sobre o curso d'água, pode ser estimada em relação ao consumo médio das pessoas na área industrial e os descartes envolvido nas operações administrativas, mecânicas e outras (MME, 2010).

A preocupação na mineração e no beneficiamento do calcário, quanto ao descarte de efluentes se dá, especialmente, em relação à possível degradação desse recurso na área de lavra e no entorno da região, por conta da movimentação de minérios e estéreis. Essa poluição é relativa a vários efeitos, que influenciam a qualidade do curso d'água, com uma alta concentração de sólidos suspensos que são lançados e, conseqüentemente, podem levar ao assoreamento dos cursos d'água. Para o processo de descarte dos efluentes originados na indústria de mineração, faz-se necessário a instalação de sistema de tratamento de efluentes para a remoção de poluentes antes de seu lançamento no curso d'água (DOMINGUES; BOSON; ALÍPAZ, 2006).

3.3 Pegada hídrica: conceitos e aplicações

O aumento do uso da água nas indústrias tem elevado a pressão sobre as empresas na gestão dos recursos hídricos na busca da sustentabilidade do uso desse recurso. O país, segundo Coltro e Karaski (2015), enfrentou problemas relacionados com a falta de chuva em 2015 e, juntamente com a demanda crescente e má gestão dos recursos hídricos, houve escassez de água em reservatórios, que acarretaram restrições no abastecimento de água para consumo humano (COLTRO; KARASKI, 2015).

Neste contexto, no ano de 2002 foi lançado o conceito de pegada hídrica por Hoekstra e Huang (2002) para medir os impactos do consumo humano e gerar indicadores

sobre a qualidade dos recursos hídricos globais de água doce. O relatório é expresso em termos de volume consumido por ano, para a quantificação de água doce que contribui para a produção de bens e serviços. As limitações do uso deste recurso estão relacionadas com os problemas de escassez e poluição devido, principalmente, ao uso de pesticidas na agricultura e poluentes lançados na água pelas indústrias (SILVA. et al, 2013).

A pegada hídrica é bastante discutida no setor das indústrias devido a questões de responsabilidade corporativa, sua imagem e marketing, seus riscos nos negócios e operações. O conceito pode ser aplicado a todo e qualquer produto que utilize água de todo processo da cadeia produtiva, apresentando a importância da gestão desse recurso. O diferencial deste indicador é que o consumo não se limita à água superficial ou subterrânea, mas também inclui a água de chuva, umidade do solo e a água considerada poluída que provem do processo produtivo (KOTSUKA, 2013).

Para avaliar o consumo direto e indireto de uma indústria, a pegada hídrica considera o volume de água consumido, ou seja, a água que não retorna como efluente para o corpo hídrico onde ocorreu a captação (MARTINS, 2014). É apresentado pela norma NBR 14046 (ABNT, 2017) os princípios para a avaliação e apresentação dos impactos de produtos ou processos, com base na avaliação no ciclo de vida (ACV) de acordo com a norma NBR 14044 (NBR, 2009). A norma NBR 14046 (ABNT, 2017) prevê ainda a definição de escopo e objetivos, inventário e mapeamento de processos, contabilização de consumos de água associados aos processos, avaliação do impacto sobre a água em função de categorias e interpretação dos resultados (MARTINS, 2014).

Para avaliação dos impactos associados ao uso consuntivo da água, há grupos que desempenham métodos para avaliar os impactos referentes a degradação do uso da água. O termo “pegada hídrica” é utilizado somente se a avaliação abordar os temas relacionados às categorias de impactos, se os resultados não forem abrangentes devem ser descritos com um qualificador, por exemplo, pegada de eutrofização hídrica, pegada de ecotoxicidade hídrica, pegada de escassez hídrica, pegada de disponibilidade hídrica, entre outros (MARINS, 2020).

A norma NBR 14046 (ABNT, 2017) é pensada para a certificação internacional, relacionada com a problemática local da região, visando benefício as organizações, governos e outras partes interessadas a nível global. A implementação do estudo possibilita a identificação da quantidade de água utilizada como também, as mudanças na qualidade da água no processo industrial, visando avaliar e identificar oportunidades de reduzir a intensidade dos impactos ambientais causados. A pegada hídrica ajuda a

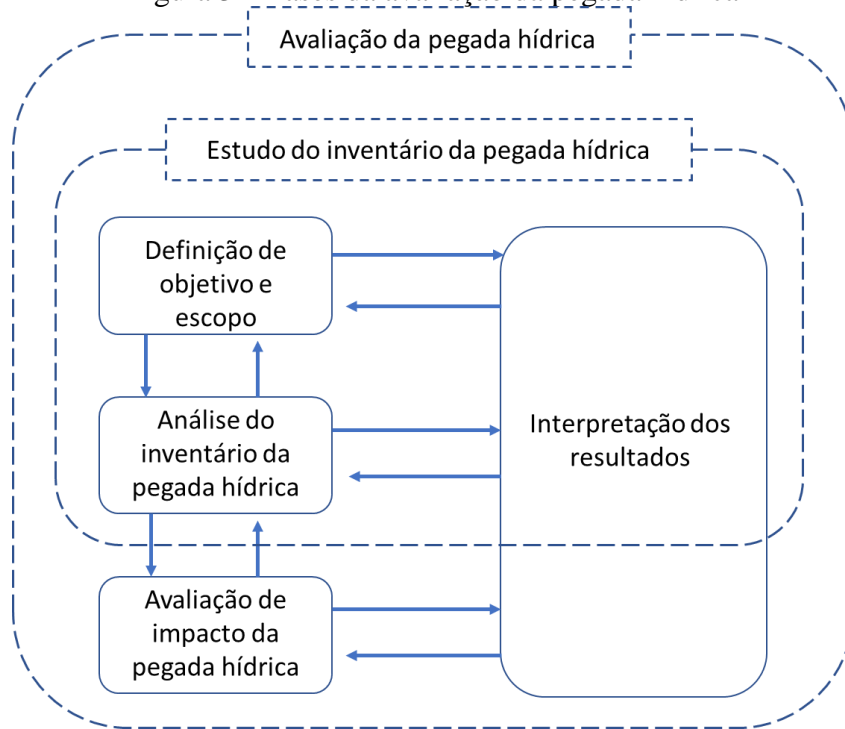
implementar uma gestão estratégica de riscos e promover a eficiência hídrica na otimização da água em seus processos. Neste contexto, facilita a informação e auxilia os tomadores de decisões na indústria sobre os seus impactos ambientais com informações confiáveis e consistentes, baseadas em evidências científicas relatadas no estudo (ABNT, 2017).

O conceito da Pegada Hídrica é baseado no cenário de consumo de um empreendimento, desenvolvida para mapear o uso direto e indireto considerando a quantidade de água consumida em todas as fases do processo de produção de um produto (MARINS, 2020). A água consumida é classificada em azul, verde e cinza devido a sua origem e impacto. A água azul é a captada em poços artesianos ou cursos d'água e que é consumida no processo - esse consumo de processo se refere à perda que ocorre por meio de evaporação ou incorporação da água no produto e não retorna ao corpo hídrico. Já a água cinza é um indicador de poluição da água que pode estar associado com o produto produzido ao longo de toda a cadeia produtiva, portanto, ela mensura o volume de água necessário para que ocorra a diluição do poluente, garantindo um padrão de qualidade da água. E a água verde é definida como a quantidade de precipitações que é armazenada no solo e que é consumida pelas plantas (HOEKSTRA et al., 2011).

A avaliação da pegada hídrica segue os procedimentos da NBR 14044 (ABNT, 2009) visto que todo o conteúdo da NBR 14046 (ABNT, 2017) faz referência e menção a ACV. A avaliação se divide em quatro fases que podem ser exemplificadas na Figura 3:

- i. Definição do objetivo e escopo;
- ii. Análise do inventário da pegada hídrica;
- iii. Avaliação de impacto da pegada hídrica; e
- iv. Interpretação dos resultados.

Figura 3 – Fases da avaliação da pegada hídrica



Fonte: ABNT (2017)

Na primeira fase de definição de objetivo e escopo, é necessário definir qual aplicação que se pretende realizar, portanto, identificar os processos que mais causam impactos, qual a abrangência geográfica do empreendimento, definir o público-alvo para comunicação dos resultados, entre outros. A segunda fase é a análise do inventário da pegada hídrica, que segue os procedimentos que estão descritos na NBR 14044 (ABNT, 2009). Envolve a coleta e preparação de dados para realizar os cálculos a fim de quantificar as entradas e saídas do processo produtivo. A descrição dos dados deve ser descrita de forma bem detalhada a fim de garantir o máximo de informação possível que possa impactar a qualidade da água e assegurar a confiabilidade dos dados (MARTINS, 2014).

A terceira fase está prevista a realização da avaliação de sustentabilidade, ou seja, é a avaliação do impacto da pegada hídrica. Essa etapa determina e avalia a significância dos impactos ambientais causados pela atividade. Segundo a NBR 14044 (ABNT, 2009), os elementos considerados obrigatórios da avaliação de impacto são: a seleção de categorias de impacto; indicadores de categoria e modelos de caracterização; a classificação, que é a correlação dos resultados do inventário do ciclo de vida com as categorias de impacto selecionadas; e a caracterização que são os cálculos dos resultados dos indicadores de categoria. Além disso, existe elementos opcionais de avaliação que

são a normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados (MARINS, 2020).

A interpretação dos resultados é a última fase, na qual constam a relação das análises do inventário e a avaliação dos impactos com a finalidade de se chegar a conclusões e recomendações (ABNT, 2017). Compreende a identificação das questões significativas com base nos resultados de cada fase, garantindo a validação dos dados, a verificação de completeza, sensibilidade e consistência. São também apresentadas as conclusões, limitações, estratégias e recomendações com base nos resultados obtidos na pegada hídrica (KOTSUKA, 2013).

A avaliação de impactos de qualquer atividade depende de metodologias e modelos aplicáveis à realidade local. Os impactos podem ser caracterizados qualitativamente ou quantitativamente. Para o caso de operações atreladas aos recursos hídricos, os principais impactos são:

- i. Uso consuntivo do recurso: redução da disponibilidade hídrica devido ao consumo de água;
- ii. Alteração na qualidade devido ao descarte de materiais com potencial poluidor no corpo hídrico.

A contabilização do uso de água por atividades econômicas, denominada também como pegada hídrica corporativa, é baseada no total de volume de água utilizada direta e indiretamente para suprimento da atividade econômica. O estudo da pegada hídrica pode ser considerado um indicador referente ao consumo de água que, em conceito, não se limita ao consumo de água superficial ou subterrânea, como também inclui a água proveniente da umidade do solo, da chuva e a água que se tornou poluída durante o processo do beneficiamento (MARTINS, 2014).

Normalmente a evaporação é a ocorrência mais significativa dentre os casos citados. No entanto, no setor de mineração, o volume de água incorporado ao produto também é um volume significativo em relação a vazão de água nova captada. Por conta desta particularidade, o volume de água incorporada ao produto é medido e discutido, demonstrando de forma estratificada o potencial de consumo de água incorporada em cada produto gerado (BICHUETI; GOMES; KNEIPP; ROSA, 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área estudada e definições gerais da avaliação de pegada hídrica

O estudo foi realizado em uma indústria de mineração, em que são realizadas operações de extração de calcário e dolomítico, além de haver fabricação de cimento Portland, localizada no Oeste de Minas Gerais.

Inicialmente foi realizado um levantamento documental, esta etapa consistiu na busca de dados e informações sobre os principais eventos que abordam questões relacionados às entradas, saídas e consumos de água da empresa.

A fronteira do estudo foi estabelecida como a unidade interna do empreendimento, considerando todas as etapas dos processos de extração da matéria prima até o ensacamento do cimento e cimento a granel.

Para efeito da definição do balanço hídrico foi considerada toda a água subterrânea, captada dos seis poços tubulares existentes, e volume de água superficial captado da barragem de água, que suprem todas as atividades da indústria. A fronteira preestabelecida foi determinada e aplicada aos produtos da unidade, entre os processos produtivos que são comercializados. Como horizonte temporal utilizou-se os anos de 2020 e 2021 para o levantamento de todos os dados que foram obtidos durante o trabalho.

Para a estimativa da vazão do corpo hídrico receptor dos efluentes da unidade, o rio Candonga, foi utilizada a série histórica de vazão do rio São Miguel devido à ausência de monitoramento do primeiro. A partir de uma análise de campo pelo empreendimento, foi verificado que ambos possuem o mesmo porte e, por estarem inseridos em uma mesma bacia hidrográfica, foi possível a utilização dos dados de monitoramento do rio São Miguel.

A utilização de água potável para consumo humano não foi classificada como processo elementar devido à baixa representatividade de volume em relação à utilizada nos processos produtivos. O consumo de água predial, foi obtido como dado estimado pois, o fluxo de funcionários varia bastante durante os meses.

Os dados considerados no estudo de pegada hídrica, para identificação de cada fluxo de água, são:

- i. A quantidade de água captada, utilizada, consumida e descartada;

- ii. Fontes de entrada e saída de águas como: água subterrânea, superficial, precipitação, evaporação, incorporação nos produtos e lançamento de efluentes, considerando seus volumes e intensidades, assim como características físico-químicas e microbiológicas de qualidade de cada tipologia;
- iii. Formas e locais de uso da água;
- iv. Mudança sazonais nos fluxos da água, como períodos de estiagens e cheias. Tal aspecto é de fundamental interesse no estudo, devido à importância da contribuição pluvial na área de abrangência do empreendimento e deposição desta água na barragem que posteriormente verte para o rio.

Os dados foram subdivididos em primários e secundários, segundo a NBR 14046 (ABNT, 2017) os dados primários devem ser coletados quando viável e os dados secundários são utilizados somente quando a coleta dos dados primários não é possível ou viável. Com isso, foi adotado as vazões medidas e calculadas como dados primários e as vazões estimadas, de projeto e premissas, adotadas como dados secundários.

Os dados foram classificados como medidos, calculados, estimados e premissas (HOEKSTRA et al., 2011). A forma como foram definidos se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Definição das variáveis em dados medidos, calculados, estimados ou premissas, utilizadas no estudo da pegada hídrica

Variáveis do estudo	Medido	Calculado	Estimado	Premissa
Vazão de captação dos poços	X	X		
Precipitação	X	X		
Umidade do produto (ROM)	X	X		
Efluente barragem			X	
Evaporação		X		
Area de abrangência	X			
Vazão do rio São Miguel			X	X
Fator de escoamento		X		
Consumo predial		X	X	
Variáveis físico-química e microbiológicas	X	X		

Fonte: Da autora (2023)

Foi realizada no empreendimento, com auxílio do Google Earth uma divisão em duas plantas: a planta de mineração e a planta de cimentos, adotando uma cobertura temporal e a distribuição geográfica intrínseca da unidade, de forma a se determinar a área de abrangência que cada planta corresponde.

Desta forma, na planta de cimentos foi considerada a área de abrangência onde está localizada a fábrica de produção de cimentos e na planta de mineração, a mina, englobando a extração e produção de fundentes (calcário calcinação, calcário sinterização, dolomito calcinação, dolomito alto forno, dolomito sinterização, ultrafino calcário e ultrafino dolomito).

O estudo da pegada hídrica para o balanço hídrico na planta de mineração adotou as pressuposições apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Pressuposições adotadas no estudo de pegada hídrica realizado na planta de mineração

Informação	Pressuposição adotada	Fonte	Observações
Característica físico-química e microbiológica da água subterrânea captada	Adotado 1 ensaio bienal para os anos de 2019/2020	Boletins de análise elaborado por Laboratório terceirizado	Considerada a média dos resultados dos poços de captação de água
Característica físico-química e microbiológica da água subterrânea captada	Adotado para o cálculo de águas cinzas apenas as variáveis similares aos monitorados no corpo hídrico e lançamento de efluentes	Boletins de análise do Laboratório contratado pelo empreendimento	Detalhamento para as variáveis utilizados e excluídos para o cálculo de águas cinzas
Característica físico-química e microbiológicas do efluente lançado	Adotado 1 ensaio por mês para cálculo de águas cinzas	Monitoramento do efluente no ponto Saída da Barragem e ensaio através do laboratório	Considerado o valor encontrado como valor de todo o mês
Precipitação	Adotado o valor da estação meteorológica para toda a bacia de drenagem	Dados da estação meteorológica	Considerado o valor de precipitação para toda a bacia de drenagem
Fator de escoamento fluvial (coeficiente runoff)	Adotado o fator de escoamento de 0,30.	Relatório de empresa terceirizada	Adotado um único fator de escoamento para toda a bacia de drenagem.

Área da bacia de drenagem da unidade	Adotado a área de drenagem de 1.828.800 m ²	Google Earth	Considerado valor como uma constante
Vazão do rio São Miguel – média ano 1978 – 2018	Adotada vazão mensal	HidroWeb ANA	Média dos valores mensais
Cálculo de evaporação	Adotada a área de espelho d'água da barragem de 78.800 m ²	Realizado por meio de levantamento topobatimétrico	Considerado valor como uma constante

Fonte: Do empreendimento (2022)

A metodologia da avaliação de impacto da pegada hídrica atendeu os critérios na norma NBR 14044 (ABNT, 2009) e requisitos da metodologia do Manual de Avaliação de pegada hídrica, para avaliação da pegada hídrica de água azul (água consumida) e pegada hídrica de água cinza (água impactada), conforme apresentado por Hoekstra et al. (2011).

A categoria de impacto adotada para o estudo foi de escassez hídrica, já que o objetivo do estudo foi verificar o uso desse recurso hídrico e mitigar o estresse causado pela poluição. Neste contexto, os volumes de captação, consumo e lançamento são fundamentais para uma avaliação volumétrica da escassez hídrica e da qualidade da água, principalmente lançada no corpo hídrico receptor, o rio Candongas, para análise primária do impacto qualitativo e análise secundária do impacto quantitativo.

Foi utilizado um indicador em metros cúbicos de água equivalente, onde, toda aplicação e citação do estudo da pegada hídrica está associada a Pegada de Escassez Hídrica ou Pegada Hídrica – Categoria Escassez Hídrica, ou seja, o estudo não foi abrangente, sendo específico dessa categoria.

No estudo não foi considerado o volume de água para consumo humano, sendo este determinado como insignificante, pois não teria relevância no resultado do estudo do impacto associado a escassez hídrica. Variáveis de qualidade da água que não eram monitoradas em toda a malha amostral, bem como variáveis de qualidade da água que não possuem limitações regulamentares para lançamento de efluentes e classificação de corpos hídricos quanto ao seu uso preponderante, também foram desconsideradas, para fins de cálculo de impacto de escassez hídrica.

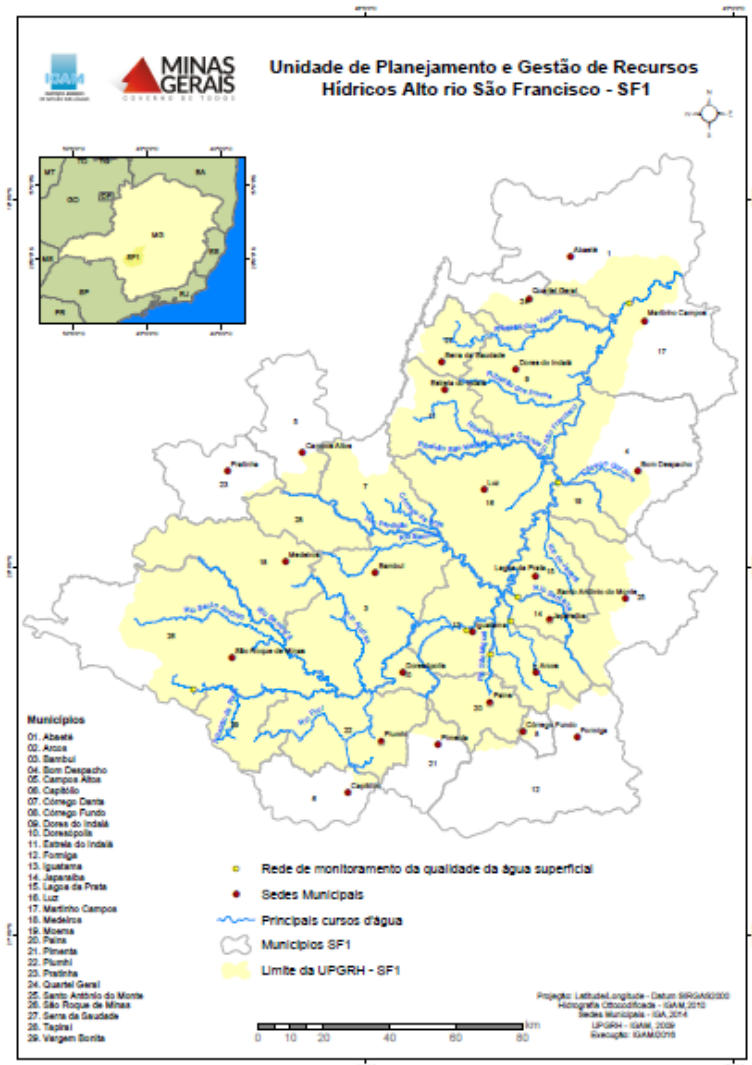
Desta forma, as linhas de base do estudo da pegada hídrica foram os anos de 2020 e 2021, considerando os volumes de água identificados no inventário do empreendimento, a produção de 2,9 milhões de toneladas de cimentos em 2020 e 2,5 milhões de toneladas de cimentos em 2021. Foram obtidos os valores, para esses anos, do regime de precipitação, e a evaporação da região.

4.1.1 Descrição da bacia hidrográfica

A mina e todo complexo minero-industrial do empreendimento estão inseridos na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Alto São Francisco (SF1) no Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes do Alto São Francisco (CBHSF) (IGAM, 2022).

A Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco (SF1), mostrada na Figura 4, possui uma área de 14.155,09 km², que corresponde a 6,03% do território da bacia do rio São Francisco. A região do SF1 é composta por vinte e nove municípios que corresponde a uma população total de 260.698 mil habitantes segundo o IBGE/CENSO realizado em 2010 (IGAM, 2022).

Figura 4 – Bacia Hidrográfica do alto rio São Francisco (SF1)



Fonte: IGAM (2022)

A Sub-Bacia Hidrográfica da região é a do rio São Miguel e a empresa é banhada pelo rio Candonga, que passa ao Norte do empreendimento, e pelo córrego Santo Antônio, que escoar ao Sul da Mina, e que tem sua foz junto à margem esquerda do rio Candonga, cerca de 4 km ao Norte do empreendimento. O rio Candonga, por sua vez, é um afluente da margem direita do rio São Miguel, este último, afluente da margem direita do rio São Francisco (TIMO, 2022).

O curso d'água do rio Candonga, percorre cerca de 30 km até sua confluência com o rio São Miguel, onde ocorrem áreas alagadas com formação de lagoas cársticas (relevo que se caracteriza pela dissolução/corrosão das rochas, formando uma série de feições). O córrego Santo Antônio é o principal afluente do rio Candonga, sendo seu tributário pela margem esquerda (DIAS; VELÁSQUES, 2002).

Situado em área cárstica, o curso principal do rio São Miguel drena perenemente em superfície em sua maior parte, possuindo direção geral S/N e cerca de 40 km de extensão. O seu padrão morfológico é meandrante até sua confluência com o rio São Francisco, a 630 m de altitude. A região pode ser caracterizada como zona de recarga do aquífero cárstico. É uma área relativamente elevada quando comparada com o entorno, além disso, o intenso fraturamento, a presença de dolinas, sumidouros e cavernas são feições cársticas que facilitam a infiltração da água pluvial e permitem o abastecimento do aquífero (TIMO, 2022).

4.2 Estrutura metodológica

O desenvolvimento do estudo da pegada hídrica, conforme os critérios adotados a partir da NBR 14046 (ABNT, 2017), abordou os impactos ambientais potenciais relacionados à água associada ao produto da atividade de mineração e produção de cimentos, ou seja, extração de calcário e dolomítico distribuídos em suas variações e produção de cimentos a granel e ensacados.

Adicionalmente, foram utilizados materiais de apoio e pesquisa como estudos técnicos, relatórios de impacto ambiental do empreendimento, avaliação de impactos hídricos e a identificação de riscos e oportunidades associados à atividade.

4.2.1 Cálculo da pegada hídrica de água azul e da pegada hídrica de água cinza

Para realização do cálculo da avaliação do impacto do consumo direto, levou-se em consideração todo volume de água perdido no processo, em que se fez o levantamento de todas as etapas que possuem perda de água, por meio de evaporação, incorporação ao produto e precipitação.

O cálculo da pegada hídrica de água azul (Equação 1), ou água consumida, seguiu a metodologia apresentada por Hoekstra et al. (2011) e é realizada para avaliação do impacto da pegada de escassez hídrica.

$$C = V_{cap} - D \quad (1)$$

em que,

C = Consumo (m^3/h);

$V_{\text{cap}} = \text{Captação (m}^3/\text{h)}$; e

$D = \text{Descarte (m}^3/\text{h)}$.

Com isso, foi possível a obtenção dos valores de consumo de água para os anos desejáveis a partir dos valores obtidos por meio do balanço hídrico.

Vale destacar, que devido a área de abrangência da atividade, a importância da avaliação da contribuição pluvial e a medição do efluente fluvial é fundamental para o fechamento do balanço hídrico, para não distorcer a medição de consumo de água. Para isso, o volume precipitado foi obtido por meio dos dados coletados em estação meteorológica instalada na unidade, que forneceu valores de todos os dias do ano em análise. Com isso, foi realizado a média mensal e anual da precipitação para o empreendimento.

Para o cálculo da pegada hídrica de água cinza, também foi seguida a metodologia apresentada por Hoekstra et al. (2011). Foram adotados os conceitos de concentração máxima admissível pelo corpo hídrico e de sua concentração natural. A diferença entre a concentração máxima que o rio pode receber (C_{max}) e a concentração natural do rio (C_{nat}) indica o montante de carga poluidora que o rio pode receber no conceito de assimilação. Assim, a carga poluidora (L) lançada por meio dos efluentes, dividida pela capacidade de assimilação ($C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}$), representa o volume de água que o corpo hídrico deverá prover para que a carga seja assimilada, de forma natural que pode ser observado na Equação 2. Esse cálculo é possível através das equações 2 e 3.

$$PH_{\text{cinza}} = \frac{L}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (2)$$

em que,

$PH_{\text{cinza}} = \text{Pegada hídrica de água cinza (m}^3/\text{h)}$;

$L = \text{Carga poluidora (mg/h)}$;

$C_{\text{max}} = \text{Concentração máxima do parâmetro no corpo hídrico (mg/m}^3)$; e

$C_{\text{nat}} = \text{Concentração natural do parâmetro no corpo hídrico (mg/m}^3)$.

A carga de poluente (L) é definida como a carga adicional àquela já contida no corpo receptor, antes da interferência da atividade em questão. Fez-se necessário, adicionalmente, o cálculo da carga poluidora para análise da contribuição do efluente

lançado e verificação de quais variáveis alterariam o curso hídrico. Esta análise foi realizada para cada mês dos anos propostos. O cálculo para a carga poluidora foi realizado com o uso da Equação 3.

$$L = V_{efl} \times (C_{efl} - C_{cap}) \quad (3)$$

em que,

L = Carga poluidora (mg/h)

V_{efl} = Vazão do efluente (m^3/h);

C_{efl} = Concentração do parâmetro no efluente (mg/m^3); e

C_{cap} = Concentração do parâmetro no manancial de captação (mg/m^3).

Devido à característica natural da temperatura da água captada e do efluente lançado pela unidade, foi considerado como desprezível o impacto térmico do lançamento dos efluentes. Neste caso, a temperatura não é uma variável de relevância e se enquadra como item de exceção do estudo (HOEKSTRA et al., 2011). Esta consideração pode ser determinada como válida devido ao histórico de monitoramento, realizado pelo empreendimento, da temperatura entre o efluente lançado e o corpo receptor, em que a diferença é menor que 1 °C, assim classificada como irrelevante impacto aos recursos hídricos.

Referente as variáveis físico-químicos e microbiológicos, os analitos utilizados para o cálculo de pegada hídrica de água cinzas foram analisados por laboratórios credenciados pelo INMETRO, com certificação e acreditação ISO IEC/17025, que define os requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, e utilizado apenas as variáveis que são monitorados em todos os pontos determinados para a obtenção do indicador, a partir dos valores obtidos no monitoramento de variáveis de qualidade da água que se encontraram fora do limite permissível.

Devido a uma condicionante de licenciamento do empreendimento, foram estabelecidas trinta e três variáveis (Tabela 3) para realização das análises físico-químicas e microbiológicas e elaboração de relatórios mensais dos resultados obtidos, de acordo com a legislação vigente. As amostras foram coletadas nas saídas das estações de tratamento de esgoto da indústria, por laboratório terceirizado, para verificação quanto ao atendimento legal.

Tabela 3 – Variáveis físico-químicas e microbiológicas analisados para a avaliação da pegada hídrica de água cinza e seu valor de limite de lançamento

Variável de qualidade da água	Limite legal (mg/L)
Arsênio	0,5
Bário	5,0
Boro	5,0
Cádmio	0,2
Chumbo	0,5
Cianeto livre	0,2
Cianeto total	1,0
Coliformes termotolerantes	1000 MNP/100 mL
Coliformes totais	ausente
Cobre solúvel ou dissolvido	1,0
Cromo	0,05
Cromo hexavalente	0,1
Cromo trivalente	1,0
DBO 5 dias a 20°C	5,0
Estireno	0,07
Etilbenzeno	0,84
Fenóis totais	0,5
Ferro solúvel ou dissolvido	15,0
Fluoreto	10,0
Manganês	1,0
Mercúrio	0,01
Níquel	2,0
Óleos minerais	20,0
Óleos/Gordura animal	50,0
Oxigênio dissolvido	> 5,0
Prata	0,1
Selênio	0,30
Sólidos suspensos	100,0
Sólidos totais dissolvidos	500,0

Sulfeto	1,0
Tetracloroeto de carbono	1,0
Tricloroeteno	1,0
Zinco	5,0

Fonte: Adaptado de Brasil (2011)

Para o consumo de água predial, foi obtido a partir de levantamento teórico, procurado na literatura, enquadrando como dado estimado devido o fluxo de funcionários que varia bastante durante os meses, de acordo com informações disponíveis pela empresa. Foi considerado o valor de 1.500 colaboradores para a realização dos cálculos.

Foi calculado também o índice de recirculação que o empreendimento possui, para verificação da eficiência de consumo consciente de água captada, já que o fluxo produtivo possui um circuito fechado, em que a água de processamento é destinada para uma Estação de Tratamento de Água (ETA) e conseqüentemente, esta água tratada, volta para o sistema de abastecimento do processo. O cálculo para o índice de recirculação se dá pela Equação 4.

$$R = \frac{V_r}{V_r + V_{cap}} \quad (4)$$

em que,

R = Índice de recirculação (%);

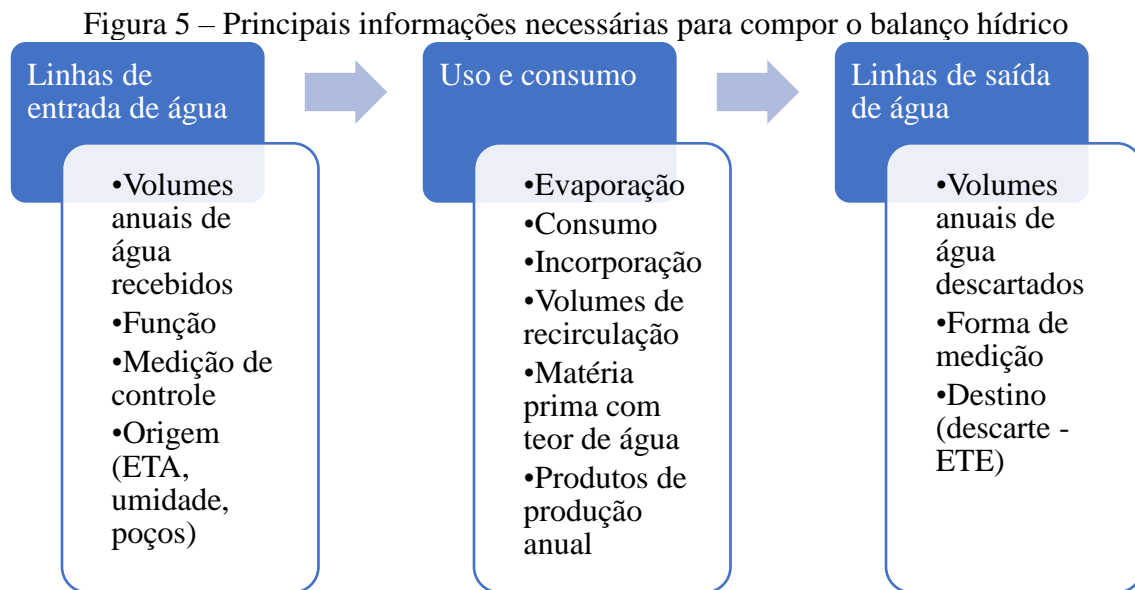
V_r = Volume recirculado (m^3/h); e

V_{cap} = Volume captado (m^3/h).

4.2.2 Balanço Hídrico

O balanço hídrico operacional é definido no projeto das instalações industriais. No entanto, com o passar do tempo, modificações operacionais e construtivas alteram os padrões de uso e consumo. A consolidação das novas condições, identificação de fluxos e funções da água são a base para a construção de um balanço hídrico atualizado e integrado. Volumes de controle inerentes aos processos, atividades ou instalações devem ser definidos previamente a construção do balanço. Na Figura 5 são apresentadas as

principais informações necessárias para compor o balanço hídrico em função do volume de controle adotado.



Fonte: Da autora (2023)

Dentre as premissas adotadas, foram considerados três correntes distintas de água: a água nova que é a água retirada do sistema de bombeamento de aquífero; a água recirculada, que é a corrente de água, depois de tratada, bombeada da caixa de armazenamento e a água de processo que é a corrente de água intrínseco ao processo de produção de cimento. Foram considerados também quatro procedimentos de medição: fluxo calculado, fluxo estimado (histórico/comparação), fluxo medido (medição direta), premissa de processo (proporções de operação).

Todos os dados foram levantados com volumes de utilização por dia, sendo convertidos em valores utilizados de volume por mês e conseqüentemente transformados em volumes por ano. Com isso, na análise serão tratados apenas como volumes calculados por mês para facilitar compreensão dos resultados, e o fechamento do balanço hídrico e análise final será feita por ano.

A determinação da água de entrada no balanço hídrico foi realizada a partir da divisão das plantas. Para a planta de cimento, foi estabelecido a água captada de 4 poços tubulares e a precipitação na área de abrangência da planta. Para a planta da mineração, foi determinado a água captada de 2 poços tubulares, a precipitação na área de abrangência da planta e a produção de minério bruta, o *run of mine* (ROM). Esses valores

foram obtidos por meio do medidor de vazão dos poços tubulares. Os valores diários são somados, tendo-se, então, o valor mensal.

A contribuição de água pluvial não foi considerada como água captada, no entanto, esta contribuição foi calculada por meio da série histórica de precipitação, área de abrangência da bacia de coleta e fator de escoamento, e utilizada como dado de entrada para cálculo do balanço hídrico para a planta de mineração e utilizado o mesmo critério para a planta de cimento.

Como forma de entrada de água, a contribuição do ROM foi calculada por meio da umidade e massa do material bruto extraído, obtido diretamente da mina sem sofrer nenhum tipo de beneficiamento, e utilizada para fechamento do balanço hídrico da unidade para a planta de mineração.

No balanço hídrico foi considerado como consumo, toda água que circula nos processos de produção e utilização, mapeando cada ponto de consumo de água em todo o empreendimento. Para a planta de cimento foi determinado como consumo a evaporação da área da barragem, pois parte da barragem está localizada em sua área de abrangência, realizado por meio de levantamento topobatimétrico, em que foi utilizado a área e o fator de escoamento para realização deste cálculo.

Os valores de volumes obtidos para a umidificação de vias, que é realizado pela empresa todos os dias em época de seca, também foram utilizados como consumo, pois os caminhões são abastecidos com as águas captadas dos poços. As torres de resfriamento utilizadas no processo de fabricação de cimento, operam com um volume representativo de água, fazendo parte do consumo.

Complementando o consumo da planta de cimento, tem-se a determinação do volume do uso de água nos moinhos de cimento que utilizam água em seu processo e por último, o equipamento utilizado para resfriar os gases quentes que sai do processo que utiliza uma vazão significativa de água.

Para a planta de mineração, há como consumo o cálculo da evaporação da barragem que está localizado em sua área de abrangência, realizado por meio de levantamento topobatimétrico.

Foi determinada a umidade de cada produto na produção de fundentes (calcário calcinação, calcário sinterização, dolomito calcinação, dolomito alto forno, dolomito sinterização, ultrafino calcário e ultrafino dolomito), pois o processo de classificação por via úmida (onde é determinado cada tipo de produto) utiliza alto consumo de água.

Os valores da umidade dos produtos foram solicitados e fornecidos pelo controle interno do empreendimento, que possui uma planilha com os valores da quantidade de água que cada produto possui. Com isso, foi possível o levantamento do volume utilizado por produto no mês, no balanço hídrico.

Para fechar o balanço hídrico da unidade, foi considerado como saída os efluentes que são lançados pelas estações de tratamento de esgoto (ETE's), pois são os únicos pontos de saída que o empreendimento possui, tanto para a planta de cimento quanto para a planta de mineração. O empreendimento possui duas ETE's pela sua área, onde toda a água que sai dos processos industriais e prédios é destinado para essas ETE's que recebem o tratamento adequado e depois são lançadas no rio.

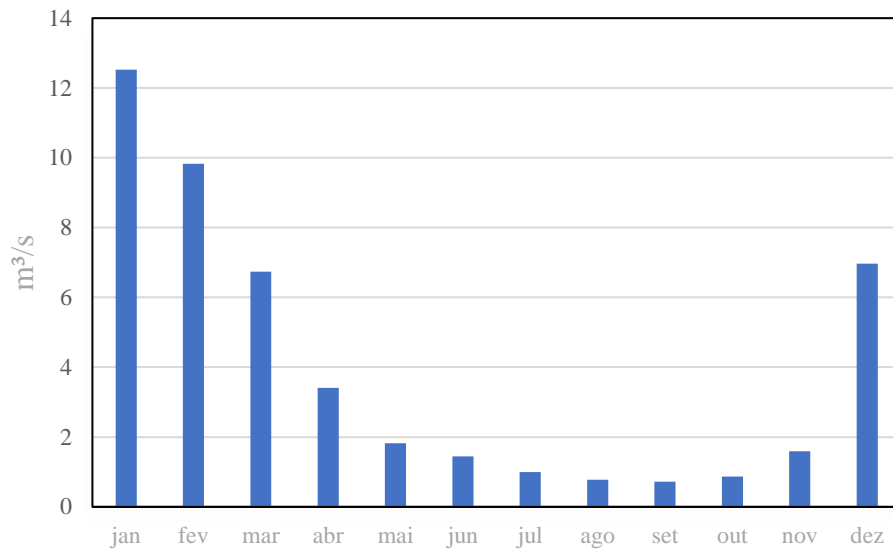
O índice de água recirculada foi definido a partir do sistema fechado de distribuição de água no processo, sendo considerada, para a planta de mineração, a água que é captada da barragem de água, local onde ocorre a destinação da água tratada que sai do processo e conseqüentemente, retorna para o processo. Já para a planta de cimento, o circuito fechado de água, foi considerado as torres de resfriamento que a água entra no sistema e depois é destinada para uma caixa d'água industrial fazendo com que ela retorne ao processo posteriormente.

4.2.3 Vazão e qualidade da água do Rio São Miguel

A vazão do rio São Miguel foi monitorada por meio de estação fluviométrica de código n° 40053001 operada pelo IGAM. Atualmente as informações de monitoramento estão disponibilizadas pela ANA por meio do sistema HidroWeb (2022). O monitoramento de vazão possui base diária e forneceu a variabilidade entre os períodos de cheia e estiagem entre os anos de 1978 e 2018. Tal histórico não foi atualizado pelo sistema da ANA a partir de 2019, com isso, adotou-se, para os anos 2020 e 2021, a média histórica de vazão no período com informações disponíveis.

As médias mensais da vazão do Rio São Miguel nos últimos 40 anos podem ser vistas na Figura 6. Estes valores foram aplicados para o cálculo de comprometimento do corpo hídrico nos anos de 2020 e 2021.

Figura 6 – Valor da vazão média mensal do rio São Miguel



Fonte: ANA (2022)

Ainda, na avaliação de IGAM (2022), referente aos indicadores de qualidade da água do rio São Miguel, foi apresentado IQA classificado como “Médio”, portanto, seu IQA esteve entre 50 e 70.

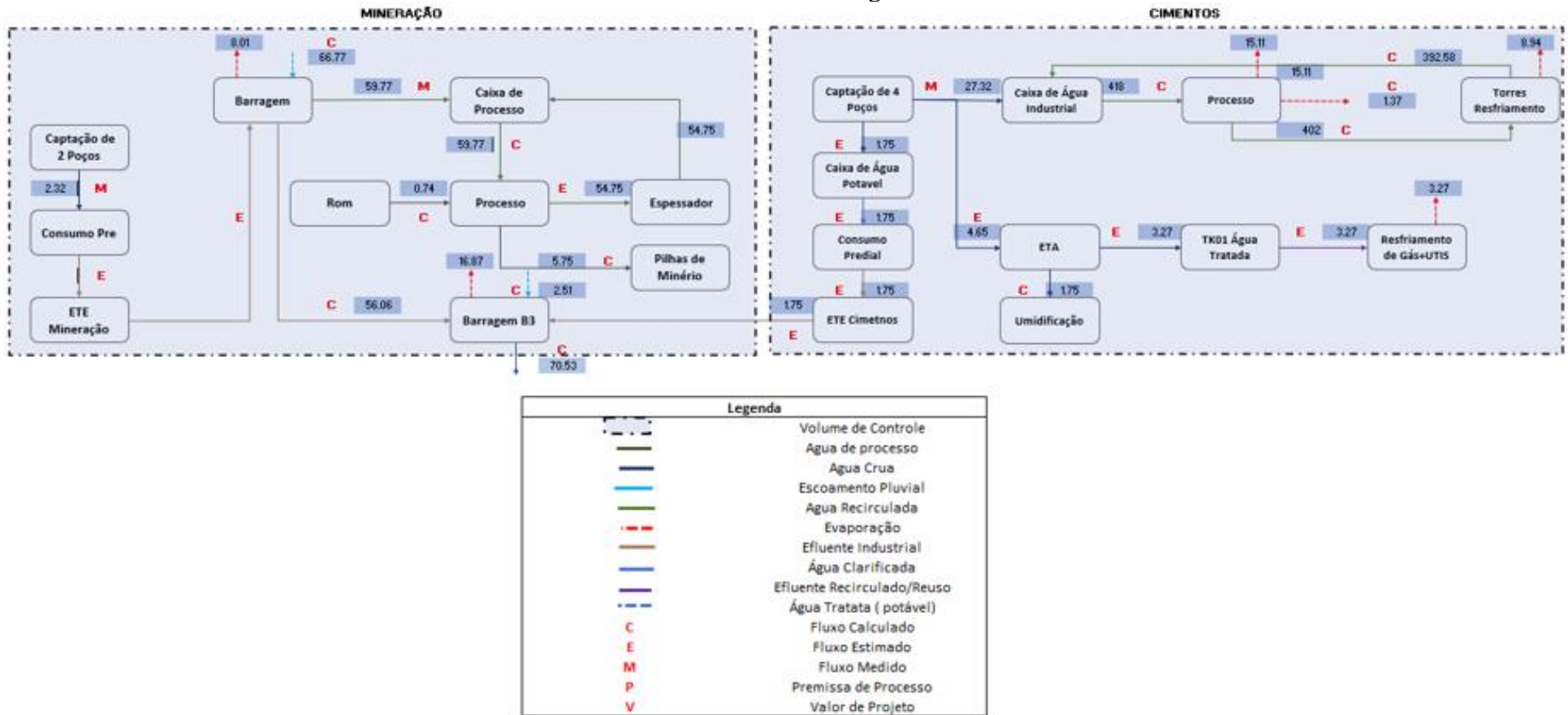
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço hídrico abrangente

A partir do levantamento dos dados realizado, determinou-se todas as linhas de fluxo e quantidade de água que cada processo utiliza. Assim, facilitando o entendimento do processo de circulação de água da unidade e obtenção dos valores reais de água. As linhas de fluxo e os procedimentos de medição do balanço hídrico do empreendimento analisado, está apresentado a média para os anos de 2020 e 2021 no balanço hídrico conforme mostra a Figura 7. Em cada ponto do sistema é representado qual fluxo foi considerado, o fluxo calculado, fluxo estimado, fluxo medido, premissa de processo e valor de projeto. No balanço foi apresentado o sentido de entrada de água em cada processo e qual o seu destino após sua saída.

Foi possível determinar a umidade de cada produto na produção de fundentes (calcário calcinação, calcário sinterização, dolomito calcinação, dolomito alto forno, dolomito sinterização, ultrafino calcário e ultrafino dolomito), totalizando um valor de 6,60 m³/h. No balanço hídrico da Figura 7, este valor está sendo representado pelo “processo” da planta da mineração. Já para a planta de cimento, representado pelo “processo”, está contemplando o valor da umidade do cimento sendo de 1,40 m³/h.

Figura 7 – Média dos anos de 2020 e 2021 para o balanço hidrico do empreendimento representando todas as linhas de fluxo encontradas para o consumo e descarte de água



Fonte: Do empreendimento (2022)

As linhas de fluxo calculado foram apresentadas na precipitação, no ROM, na entrada de água dos processos, na umidificação de vias, nas pilhas de minério e no circuito fechado do processo de cimento, como pode ser observado na Figura 7.

A umidificação de vias apresentou um valor baixo de consumo de água de 1,75 m³/h. É possível observar que o consumo de água nos processos de cimentos é bem mais expressivo que o da mineração, sendo o consumo da mineração de 59,77 m³/h e da cimentação 418 m³/h. De acordo com dados informados por estudos realizados na empresa, a umidade que o cimento possui é de 0,5%, ficando essa água retida no material final, considerando os 2,9 milhões de toneladas produzidos no ano que contribui para o valor de consumo de água. Em cada etapa do processo de fabricação de cimento Portland tem-se a utilização de água, como nas moagens de farinha, moagens de clínquer e moagens de cimento, os valores encontrados para cada processo estão englobados no valor final.

Adicionalmente, é possível verificar que a perda de água por evaporação é representativa, já que se tem um total de 53,57 m³/h. Esta perda por evaporação foi representada como dados de consumo, já que esta água não é lançada em forma de efluente para o curso d'água, pois, sofre evaporação e, posteriormente, pode ou não retornar à mesma bacia em forma de precipitação.

As linhas de fluxo estimado foram apresentadas na saída do consumo predial, na saída das ETE's, na saída do processo da mineração, na quantidade de água que é destinada para caixa de água potável, entrada da ETA e água destinada às torres de resfriamento. Também foi preciso utilizar dados de projetos para esses pontos devido à não haver monitoramento, com isso, estes foram classificados na categoria de fluxos estimados, por serem valores aproximados.

O consumo predial foi obtido por meio de levantamento teórico, considerado estimado, pois o fluxo de funcionários varia bastante durante os meses, de acordo com informações disponíveis pela empresa, chegando em um valor representativo para esse consumo de 1,75 m³/h.

Após o levantamento do balanço hídrico, foi possível observar algumas variações mais expressivas entre os 2 anos de acordo com informações obtidas antes do estudo da pegada hídrica, disponibilizadas pela empresa, como:

- i. Redução de 19,75% de contribuição pluvial em 2021 que, consequentemente, reduziu 15% da vazão de lançamento de efluente na saída da barragem com destino o rio Candongas;

- ii. Foi observado aumento de 4% do volume de água consumida por meio da umidade de produtos, evaporação, umidificação de vias, e resfriamento de gases;

Ainda analisando o balanço hídrico (Figura 7), tem-se que o efluente da planta de cimentos é gerado apenas pelo descarte predial, destinado para a ETE de cimentos e, depois do tratamento, destinado para a barragem que verte no corpo receptor. Da planta de mineração pode ser verificado que o efluente também é gerado pelo descarte predial, destinado para a ETE da mineração e, depois do tratamento, destinado para a barragem e pela contribuição da água pluvial.

O levantamento do balanço hídrico da unidade possibilitou o conhecimento de todo fluxo existente, e esquematizar linhas e quantidades de entrada e saída de água de cada processo. Antes do levantamento do estudo da pegada hídrica a empresa não possuía um balanço hídrico determinado com esse nível de detalhamento, conseqüentemente, não era conhecida a origem e qual a contribuição do descarte do recurso hídrico utilizado. Desta forma, dificultava-se a identificação imediata de possíveis falhas, como vazamentos, por exemplo.

Esta interação com os recursos hídricos foi possível por meio do levantamento das quantidades de água que são captadas de cada poço. Foi possível verificar que a quantidade de água captada, dos 6 poços existentes, é suficiente para seus processos. A vazão captada é de 65 m³/h que, ao ser relacionar com o que é perdido por evaporação e o descarte de efluente das ETE's, tem-se o valor de 57 m³/h, como também a água que fica retida no cimento e a umidade de cada fundente que é extraído e comercializado, totalizando um valor de 8 m³/h. Assim, afirma-se que, basicamente o que é captado dos poços é utilizado para repor a água que foi descartada e evaporada nos processos, como também a água que fica retida no cimento e a umidade de cada fundente comercializado.

5.2 Avaliação de impacto da pegada hídrica

A avaliação da disponibilidade de água foi feita, a partir dos conceitos considerando os impactos relacionados aos aspectos de consumo direto, de pegada hídrica de água azul, e o consumo indireto de pegada hídrica de água cinza.

5.2.1 Consumo direto

O consumo direto de água azul da unidade, foi calculada realizando o consumo direto através da diferença do volume de água captada e descartada na unidade (Equação 1), sendo possível verificar que se trata de um método de simples aplicação para a medição dos volumes de água captada e efluente descartado, possui uma elevada frequência de medição e o atendimento de demandas legais, como cumprimento de condicionantes de outorgas. No entanto, podem definidos aspectos negativos, como: é negligenciada a elevada influência da contribuição de água pluvial no cálculo, podem ser contabilizados consumos negativos e, portanto, haver distorções no resultado.

Os dados apresentados com o valor anual para os anos de 2020 e 2021 que foram encontrados para as entradas, saídas e consumos, para as duas plantas, podem ser vistos a Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado dos dados consolidados calculados para entrada, saída e consumo realizado no balanço hídrico, para os anos de 2020 e 2021

Entradas	Vazões (m ³ /h)	
	2020	2021
Entradas		
Água captada total	28,17	36,81
Precipitação total	92,80	74,47
Umidade produtos e ROM	0,69	0,78
Total	121,66	112,06
Saídas		
Efluente	76,24	64,82
Total	76,24	64,82
Consumo		
Total	45,42	47,24

Fonte: Do empreendimento (2022)

Não há medidor de vazão na barragem onde está localizado o vertedouro final, que drena o efluente da indústria para o rio Candongas, conseqüentemente, os resultados de lançamento de efluentes foram estimados por meio de balanço de massa, utilizando o método diferença de volume (entradas - saídas). Desta forma, não foi possível verificar

se os valores encontrados eram condizentes com a realidade do valor de lançamento que está sendo vertido no rio Candonga.

Além disso, pôde ser verificado que o volume captado dos poços teve um aumento em 2021 (Tabela 4), devido à redução de contribuição pluvial, ao aumento da produção e vazamentos de água em tubulações não mapeados, conforme informação interna da empresa.

5.2.2 Consumo indireto

Os valores obtidos na realização do cálculo de carga poluidora foram determinados mensalmente e, se encontram apresentadas as variáveis de qualidade da água que ultrapassaram os limites permitidos para o lançamento para o ano de 2020 na Tabela 5, enquanto para o ano de 2021, na Tabela 6. Assim, foi possível analisar a carga poluidora de cada mês e verificar ao final, quais variáveis comprometeram o curso hídrico total no ano da concentração poluidora.

Tabela 5 – Valores e variáveis que ultrapassaram os limites legais para o lançamento, em cada mês para o ano de 2020

Mês	Valores (m ³ /h)	Variáveis
Janeiro	155,53	Sólidos totais
Fevereiro	594,72	DBO
Março	11,31	Sólidos totais
Abril	0,87	Ferro
Mai	0,96	Ferro
Junho	0,66	Ferro
Julho	0,30	Ferro
Agosto	0,33	Ferro
Setembro	0,33	Ferro
Outubro	0,33	Ferro
Novembro	0,30	Ferro
Dezembro	517,22	Sólidos totais

Fonte: Do empreendimento (2022)

Para o ano de 2020 é possível verificar que as variáveis que ultrapassaram os limites, de acordo com os relatórios disponibilizados pelo empreendimento, foram os Sólidos totais, o Ferro e a DBO.

Tabela 6 – Valor e variáveis que ultrapassaram os limites legais para o lançamento, em cada mês para o ano de 2021

Mês	Valores (m ³ /h)	Variáveis
Janeiro	35,08	Sólidos totais
Fevereiro	145,53	Sólidos totais
Março	94,25	Sólidos totais
Abril	0,39	Oxigênio dissolvido
Mai	0,42	Ferro
Junho	21,0	Ferro
Julho	*	*
Agosto	*	*
Setembro	*	*
Outubro	*	*
Novembro	194,07	Coliformes
Dezembro	491,63	Sólidos dissolvidos

Legenda: (*) Ausência de relatório de análise.

Fonte: Do empreendimento (2022)

Para o ano de 2021 foi possível verificar que os variáveis que ultrapassaram os limites, de acordo com os relatórios disponibilizados pelo empreendimento, foram sólidos totais, sólidos dissolvidos, ferro, oxigênio dissolvido e coliformes.

O resultado do volume da pegada hídrica de água cinza é, então, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado do volume da pegada hídrica de água cinza calculado, para os anos de 2020 e 2021

Ano	Volume da pegada hídrica de água cinza (m ³ /h)
2020	102,21
2021	80,60

Fonte: Do empreendimento (2022)

As Tabelas 8 e 9 apresentam a representatividade percentual, dos volumes da pegada hídrica de água cinza de cada variável acima do limite para os anos analisados, respectivamente, bem como o percentual da poluição que ocorre no rio devido o lançamento dessas variáveis. Os volumes mostrados na Tabela 7 representam, respectivamente, 0,74% (Tabela 8) e 0,57% (Tabela 9).

Tabela 8 – Volumes da pegada hídrica de água cinza e estresse hídrico de cada variável acima do limite legal para 2020

Variável de qualidade da água	Volume da pegada hídrica de água cinza em m³	Volume da pegada hídrica de água cinza, em percentual (%)	Percentual de estresse hídrico (%)
Sólidos Totais	509.017,4	54,97	0,4050
DBO	413.924,9	44,70	0,3293
Ferro	2.985,3	0,32	0,0024
Total	925.927,7	100	0,7367

Fonte: Do empreendimento (2022)

Tabela 9 – Volumes da pegada hídrica de água cinza e estresse hídrico de cada variável acima do limite legal para 2021

Variável de qualidade da água	Volume da pegada hídrica de água cinza em m³	Volume da pegada hídrica de água cinza, em percentual (%)	Percentual de estresse hídrico (%)
Sólidos Totais	559.786,9	78,27	0,4466
Oxigênio dissolvido	279,0	0,04	0,0002
Ferro	15.432,3	2,16	0,0123
Coliformes	139.729,1	19,54	0,1115
Total	715.227,2	100	0,5706

Fonte: Do empreendimento (2022)

O resultado da porcentagem calculada do estresse causado no corpo hídrico, nos 2 anos, foi obtido a partir da relação entre o volume da pegada hídrica de água cinza com

a vazão anual do rio. Com isso, determinou-se a porcentagem de estresse hídrico de cada variável.

Pode ser observado que a legislação estadual, Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH–MG nº 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008), é mais restritiva do que a Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011), sendo o limite da variável Sólidos Suspensos Totais estabelecido em 100 mg/L no estado de Minas Gerais, enquanto na legislação federal não há limite de lançamento. Com isso, mesmo com os valores acima do limite, foi verificado que foi pequena contribuição para a poluição do curso d'água receptor, ao longo dos dois anos avaliados levando em consideração as legislações. Nas Tabelas 8 e 9, são apresentadas as porcentagens da representatividade do estresse hídrico que ocorre no rio, devido ao lançamento de efluentes.

Ao avaliar as variáveis que ultrapassaram os limites, foi visto que o que mais se repete é o Ferro para o ano de 2020, contudo, a sua contribuição de poluição no cálculo da pegada hídrica de água cinza foi baixa, cerca de 0,32% (Tabela 8). Em 2021 a variável que mais se repetiu foi “Sólidos Totais”, também sendo a que mais contribuiu para o volume da pegada hídrica de água cinza, representando 78,27 % (Tabela 9) e gerando aproximadamente 0,45% de estresse hídrico no curso d'água.

Portanto, o lançamento de sólidos totais foi o que mais contribuiu para a poluição do curso hídrico receptor, devido ao maior volume de pegada hídrica de água cinza para os dois anos (Tabelas 8 e 9).

Com isso, têm-se que a variável que mais contribuiu para a poluição do corpo hídrico não é capaz de alterar o IQA e a vazão do curso d'água onde é realizado o lançamento desse efluente devido a sua baixa contribuição para o estresse do corpo hídrico, verificado pelos resultados obtidos. Com a análise, pôde-se estabelecer que o impacto gerado no corpo hídrico receptor pelo empreendimento é mínimo, sendo esse, inferior a 1% no período analisado.

5.3 Índice de recirculação

A título de comparação, foi disponibilizado pela empresa o índice de recirculação antes da realização do estudo de pegada hídrica de 80,95%. Os valores dos índices de recirculação encontrados após a realização do estudo da pegada hídrica, para o ano de 2020 foi de 95% e para o ano de 2021 foi de 94%. Com isso, verificou que aumentou a

eficiência do processo de recirculação comparado com os anos anteriores que não tinha monitoramento do índice de recirculação do empreendimento, apenas um levantamento por alto (disponibilizado pela empresa, sem verificação correta do índice). O aumento do índice de recirculação representa, cada vez menos pressão sobre os recursos hídricos e menor dependência de água nova captada.

Com a realização do estudo, foi possível observar que o empreendimento possui um bom índice de recirculação, que anteriormente não era contabilizado corretamente esse valor.

Foi verificado que a barragem atua como reservatório de água pluvial onde é realizado a captação de água superficial que segue para o processo e conseqüentemente retorna para a barragem. O que não retorna para a barragem é atribuído a água consumida por incorporação aos produtos e evaporação.

A captação dos poços é necessária para manter o nível estável de recirculação da unidade, suprindo o fluxo de água que não retorna para o processo produtivo, definido como consumo.

6. CONCLUSÕES

O levantamento do estudo da pegada hídrica da indústria de fabricação de cimento Portland da mesorregião Oeste de Minas Gerais permitiu verificar a quantidade de água que é consumida em cada processo da fabricação do cimento e quais são seus destinos, facilitando, portanto, a gestão dos recursos hídricos.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que, foi possível entender como as operações e processo do empreendimento interagem com os recursos hídricos a partir do levantamento do balanço hídrico realizado. Assim, é possível verificar falhas que possam acontecer, como o vazamento de água em algum ponto específico do fluxo.

Pôde ser verificado que a quantidade água captada dos poços tem por objetivo apenas para manter o nível estável de utilização de água nos processos, devido ao alto aproveitamento do índice de recirculação na unidade.

O estudo realizado contribuiu para verificar a eficiência do processo de recirculação que o empreendimento possui, visto que, com o maior o índice de recirculação menor é a dependência de água nova captada.

Foi possível também determinar que a empresa não contribui para o nível de estresse hídrico do corpo receptor, visto que o efluente lançado não possui capacidade para gerar impacto negativo no rio.

Devido à falta de dados sobre a vazão do efluente que é lançado no corpo hídrico, é recomendado a instalação de medidor de vazão no fluxo de água na saída da barragem que verte no rio Candonga, o que favoreceria o equilíbrio do balanço hídrico da planta de beneficiamento e maior precisão do monitoramento e verificação de redução de captação específica de água nova.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília, 2006. 334 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb**. 2022. Buscador de séries históricas de estações. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 20 de out. de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 13028:2017**. Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragem para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14044:2009**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14044:2017**. Gestão ambiental – Pegada Hídrica – Princípios, requisitos e diretrizes. ed. 1. Rio de Janeiro, 2017.

BARBOSA, Eduarda Pereira. **Fundamentos básicos de geotecnia em mineração**. 1. ed. São Paulo: Ed. Platos Soluções Educacionais S.A., 2021.

BICHUETI, Roberto Schoproni; GOMES, Clandia Maffini; KNEIPP, Jordana Marques; ROSA, Luciana Aparecida Barbieri da. **Gestão estratégica do uso da água na mineração**: Um estudo multicascos em empresas brasileiras. São Paulo: Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA, mai./ago., 2015. ISSN: 1981-982X. DOI: 10.5773/rgsa.v9i2.986.

BRASIL. **Resolução CONAMA n° 430/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes, complementa e altera a Resolução ° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF. 2011.

BRASÍLIA (DF). **Lei n° 9.433/1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1° da Lei n° 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n° 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF. 1997.

COLTRO, Leda; KARASKI, Thiago U. Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens. **Pegada Hídrica: Do conceito à normatização**. Campinas, SP, v. 27, n. 1, jan./mar. 2015. ISSN 2175-5000.

DIAS, Frederico Soares; VELÁSQUES, Leila Nunes Menegasse. **Hidrogeologia da bacia do rio São Miguel, município de pains e arcos – MG.** Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, MG. Jul., 2002.

DOMINGUES, Antônio Félix; BOSON, Patrícia Helena G.; ALÍPAZ, Susana. **Gestão dos recursos hídricos e a mineração.** Brasília, DF: Instituto Brasileiro de Mineração e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Junho, 2006.

FIGUEIREDO, Múcio do Amaral. MINERAÇÃO E CRISE HIDRICA EM MINAS GERAIS: QUADRILÁTERO FERRÍFERO/QUADRILÁTERO AQUÍFERO. São João del – Rei: Caderno de Geografia, v. 31, número especial 1, 2021. ISSN 2318-2962.

GRANDCHAMP, C. A. P.; VELÁSQUES, L. M. N. **Determinação do balanço hídrico na recuperação do nível de água do aquífero Cauê na Mina de Águas Claras, Serra do Curral, Município de Nova Lima, Minas Gerais.** Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, MG. Jul., 2002.

HOEKSTRA, Arjen Y. *et al.* **Manual da Avaliação da Pegada Hídrica:** Estabelecendo o Padrão Global. São Paulo. 2011.

HOEKSTRA, A. Y.; HUANG, P. Q. **Value of Water.** Relatório nº 11. IHE DELFT. Holanda, p. 120. 2002.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM) – **Monitoramento da qualidade das águas.** 2022. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso em: 24 de nov. de 2022.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM) – **Portal dos comitês.** SF1 – CBH do Alto São Francisco, 2022. Disponível em: <https://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais-mg/sf1-cbh-alto-sao-francisco>. Acesso em: 27 de out. de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Água e Mineração: Fatos e Verdades.** Belo Horizonte, MG. 2015.

IRAMINA, Wilson Siguemasa; TACHIBANA, Ivan Koh; SILVA, Leonardo Motta Camargo; ESTON, Sérgio Médici de. **Identificação e controle de riscos ocupacionais em pedreiras da região metropolitana de São Paulo.** REM. Ouro Preto, MG, p. 503-509, out./dez. 2009.

KELES, Karen Costa. **Influência da Basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto.** Orientador: Profa. Dra. Sebastiana Luiza Bragança Lana. 2011. 106 p.

Dissertação de Pós-Graduação (Mestrado em análise e seleção de materiais – Design e seleção de materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2011.

KOTSUKA, Luziadne Katiucia. **Avaliação dos conceitos de água virtual e pegada hídrica na gestão de recursos hídricos**: Estudo de caso da soja e óleo de soja. Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger. 2013. 144 p. Dissertação de Pós-Graduação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MARINS, Manoela Anechini Simões. **Avaliação da Pegada de Escassez Hídrica**: Um comparativo entre duas metodologias de pegada hídrica aplicada no campus Sorocaba de Universidade Federal de São Carlos. Orientador: Prof. Dr. André Cordeiro Alves dos Santos. 2020. 137 p. Dissertação de Pós-Graduação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental) Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

MARTINS, Renata de Souza Leão. **Empresas e Gestão da Água**: Uma abordagem a partir do uso do indicador pegada hídrica. Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Jacobi. 2014. 179 p. Dissertação de Pós-Graduação (Doutorado em Ciência Ambiental), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**. Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan./jun. 2012.

MINAS GERAIS. **Deliberação normativa conjunta COPAM/CERH nº 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Minas Gerais, MG. 2008.

MINISTÉRIO de Minas e Energia (MME). **Projeto Estal: Produto RT 38 perfil do calcário**. 2010.

MORAIS, Bárbara Alvarenga de. **Estudos de casos reais de aplicação de secagem em rejeitos de minério de ferro visando a destinação como insumos de materiais de construção civil**. Orientador: Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez. 2022. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, Minas Gerais, 2022.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Calcário e Dolomito. Rochas e Minerais Industriais**, CETEM. Rio de Janeiro, p. 327-350. 2005.

SANTOS, Evandro Gomes dos. **Recuperação ambiental na disposição de estéril em mineração de calcário**. Rio Grande do Sul. Tecnologia em Mineração, 2014.

SILVA, A. C.; MENDES, M. V. A.; SILVA, E. M. S. Substituição de areia por magnesita na formulação do concreto. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**. São Paulo, v.13, n. 3, p. 265-269, jul./set. 2016.

SILVA, Y. F.; GRZEBIELUCKAS, C.; SANTOS, J. S. C. DOS; RIBEIRO, M. A. Pegada hídrica dos acadêmicos do curso de ciências contábeis da UNEMAT de Tangará da Serra MT. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 947-962, jul./set. 2020. DOI:10.19177/rgsa.v9e32020947-962.

SILVA, Lettycia Pinheiro da. **Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 5, Ed. 5, Vol. 1, p. 05-25. 2020. DOI 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/tipos-de-cimento.

SILVA, Mab. R. C. L.; LOPES, M. D.; FERREIRA, R. L. Análise da gestão Ambiental de uma mineradora de calcário. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 73-91, jul./set. 2020.

SILVA, Vicente de P. R. da. *et al.* Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v. 17, n. 1, p. 100-105, 2013.

TIMO, Mariana Barbosa. **Caracterização geomorfológica da região cárstica Arcos-Pains e de seus sistemas cársticos**. Belo Horizonte, MG, jan., 2022. ISSN: 2318-2962. DOI: 10.5752/ p.2318-2962.2022v32n.68p.156.