

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
UNIDADE FRUTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS**

**ESTUDO DE CASO: A EXECUÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO
DA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA ALAGOA 2**

**Gustavo de Souza Ali Mere
Engenheiro Civil e Geotécnico**

**FRUTAL-MG
2022**

GUSTAVO DE SOUZA ALI MERE

**ESTUDO DE CASO: A EXECUÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO
DA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA ALAGOA 2**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora
Dra. Stefânia Lima Oliveira Metzker

**FRUTAL-MG
2022**

M558e Mere, Gustavo de Souza Ali
Estudo de caso : a execução do túnel de adução da
central geradora hidrelétrica Alagoa 2 / Gustavo de Souza
Ali Mere. - Frutal. - 2022.
90 f. : il., tab.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado
de Minas Gerais - Unidade Frutal, 2022.
Orientadora: Stefânia Lima Oliveira Metzker.

1. Energia hidrelétrica. 2. Central geradora hidrelétrica.
3. Túnel de adução. 4. Impactos ambientais. I. Metzker,
Stefânia Lima Oliveira. II. Universidade do Estado de
Minas Gerais - Unidade Frutal. III. Título.

CDU 621.31

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Gesiane Patrícia de Souza CRB-6/1894



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

GUSTAVO DE SOUZA ALI MERE

ESTUDO DE CASO: A EXECUÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO DA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA ALAGOA2

Dissertação apresentada a Universidade do Estado de Minas Gerais, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, área de concentração Ciências Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologia, Ambiente e Sociedade, para à obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de dezembro de 2022.

Prof. Dr. Tarcisio Barreto Celestino

USP São Carlos

Prof. Dr. Leandro de Souza Pinheiro

UEMG Frutal

Profa. Dra. Stefânia Lima Oliveira Metzker

Orientadora



Documento assinado eletronicamente por **Stefânia Lima Oliveira, Professora de Educação Superior**, em 16/12/2022, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tarcisio Barreto Celestino, Usuário Externo**, em 25/12/2022, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro de Souza Pinheiro, Diretor**, em 23/02/2023, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **57685750** e o código CRC **374A0DC1**.

Referência: Processo nº 2350.01.0005637/2021-08

SEI nº 57685750

Dedicatória

Gostaria de dedicar este trabalho ao futuro que está por vir em ações e vontades que me alimentam por educar e transparecer os conhecimentos adquiridos em vida segundo sempre o verdadeiro princípio que parte do meu coração e norteia meus passos como homem, humano, marido, cidadão, honesto, trabalhador, irmão, aprendiz, filho e agora pai dentro deste universo criador que só posso agradecer e dedicar desde minhas experiências, vivência e criação às reais travessias de minha vida para, por fim, nos braços do meu eterno amor e esposa dedicar esta tão sonhada concretização de um sonho adolescente, real e justa vitória que é tê-la como braço direito, esquerdo, perna, cabeça e coração do meu locomover, te amo e num grito na imensidão. Sinto esta propagação diante o vácuo que ressoará anos luz que é e será pra sempre minha tão querida e amada Dani, obrigado por impulsionar em estímulos eu para além do meu próprio eu.

Assim, dedico estas páginas ao nosso futuro juntos e agora com o Ângelo também. E... Amar é ir além de si e no outro se encontrar, para ir além da dor se fazer um, aprendendo a amá-lo por primeiro.

Beijos no coração Daniella Brito Côrtes e que Jesus seja nossa morada e companhia para caminharmos eternamente juntos, aliados da sua presença dia após dia nesta vida para colhermos no fruto das bem aventuranças a Divina providência de suas mãos.

Edificando

Encontrar um desafio/ E vivê-lo
Como solução/ De um só aprendizado.
Que terá que romper/ As dificuldades
Como ensinamento cotidiano/
De como se tornar melhor/
Não por competir/
Mas sim por superar/
Qualquer crítica/
E enxergar desta metáfora/
Desabafo/ ou mesmo inveja/
Construção sólida do eu/
Sendo mais forte/
Do que qualquer temporal/
Apontamento/ ou estrondo/que abale/
A estrutura do seu esqueleto/
Em ser/
Nunca se sabe/a pedra que jogada será/
De onde virá/ ou se acertará/
Somente sabe-se/
Que pedras haverão no caminho/
De qualquer um/
Então aprenda/
A dançar/ A cantar/ Abraçar/ Elogiar /Chorar
E se amar/
Para das pedras/
Construir a felicidade/
De poder viver/
O que se pode superar.

Gustavo Ali Mere

RESUMO

A sociedade está em constante crescimento e desenvolvimento e, como consequência, observa-se o aumento da necessidade do consumo da energia elétrica. Estimativas revelam que em 2047 o Brasil terá o seu pico populacional, o que corrobora com a afirmativa de que o consumo de eletricidade continua em expansão. Nesse sentido, surge a necessidade de maior controle da exploração e geração de energia elétrica. Por sua vez, o principal meio para a produção de eletricidade no Brasil é a geração de hidroeletricidade. A hidroeletricidade pode ser produzida a partir de usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e centrais geradoras hidrelétricas. Dessa forma, este trabalho apresenta as centrais geradoras hidrelétricas como uma alternativa descentralizadora e em crescimento, com menores intervenções ambientais e maiores fomentos. É diante deste novo cenário de maiores preocupações quanto aos impactos de um empreendimento hidrelétrico que se apóia o estudo deste trabalho, tendo como objetivo apresentar os motivos que levaram à construção do túnel no circuito de adução em baixa pressão da Central Geradora Hidrelétrica Alagoa 2 e, deste modo, qualificar os impactos ambientais, econômicos e sociais, tanto do arranjo prévio, por condutos metálicos, como do arranjo final, por túnel de adução em baixa pressão no trecho do penhasco da CGH Alagoa 2. Para isso, se fez necessário o método dedutivo partindo de uma teoria geral e utilizando o raciocínio lógico para explicar o conteúdo das premissas, e com tais elementos estudar o caso da construção do túnel na central geradora hidrelétrica situada na cidade de Alagoa/MG. Desse modo, foi realizada uma análise sistemática das documentações da obra e uma criteriosa caracterização da área de estudo alicerçada em condicionantes geológico-geotécnicos; ainda foram analisados os principais impactos relacionados à construção do sistema de adução do trecho do penhasco. Assim, diante de tais elementos, foi possível concluir que a implantação do túnel, embora de maior custo, trouxe um bem-estar muito maior, gerando menores impactos ambientais. Ademais poderia ter sido mais benéfica se o túnel tivesse sido planejado desde o início das implantações da central geradora hidrelétrica, podendo fornecer resíduos de rocha da escavação do túnel para a própria obra num contexto típico de economia circular.

Palavras-chave: Energia hidrelétrica. Central geradora hidrelétrica. Túnel de adução. Impactos ambientais.

CASE STUDY: THE EXECUTION OF THE ALAGOA2 HYDROELECTRIC POWER PLANT ADDUCTION TUNNEL

ABSTRACT

Society is constantly growing and developing and, as a consequence, there is an increased need for electricity consumption. Estimates show that in 2047 Brazil will have its population peak, which corroborates the statement that electricity consumption will continue to expand. In this sense, there is a need for greater control of the exploration and generation of electricity. In turn, the main means for electricity production in Brazil is the generation of hydroelectricity. Hydroelectricity can be produced from hydroelectric plants, small hydroelectric centers and hydroelectric generating plants. Thus, this paper presents hydroelectric generating plants as a decentralizing and growing alternative, with smaller environmental interventions and greater stimulation. It is in view of this new scenario of greater concerns about the impacts of a hydroelectric project that this study is based on, aiming to present the reasons that led to the construction of the tunnel in the low pressure adduction circuit of the Alagoa Hydroelectric Generating Plant 2 and, thus, qualify the environmental, economic and social impacts, both the previous arrangement, by metal conduits, and of the final arrangement, by low pressure adduction tunnel in the stretch of the cliff of CGH Alagoa 2. For this, the deductive method was necessary starting from a general theory and using logical reasoning to explain the content of the premises, and with such elements to study the case of the construction of the tunnel in the hydroelectric generating plant located in the city of Alagoa/MG. Thus, a systematic analysis of the documentation of the work and a careful characterization of the study area based on geological-geotechnical constraints were carried out; the main impacts related to the construction of the cliff stretch adduction system were also analyzed. Thus, in view of these elements, it was possible to conclude that the implementation of the tunnel, although at higher cost, brought much greater well-being, generating less environmental damage. Moreover, there could be more benefits if the tunnel had been planned since the beginning of the implementations of the hydroelectric generating plant, and could provide rock waste from the tunnel excavation for the work itself in a typical context of circular economy.

Keywords: Hydroelectric power. Hydroelectric generating plant. Adduction tunnel. Environmental impacts.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1. O cenário energético no Brasil.....	17
3.2. A energia hidrelétrica no Brasil.....	20
3.3. Central Geradora hidrelétrica e o novo cenário energético nacional, arranjo de seus componentes e impactos associados.....	25
3.4. Túneis de adução e implicações no contexto de uma CGH	34
3.5. Caracterização da área de estudo	37
3.5.1. Localização e apresentação da área de estudo	37
3.5.2. Geologia regional da área de estudo	42
3.5.3. Relatório geológico-geotécnico prévio, inicial para realização do trecho de adução em baixa pressão via condutos metálicos em toda sua extensão	50
3.5.4. Relatório geológico-geotécnico para elaboração do trecho de adução em baixa pressão por túnel	52
4. METODOLOGIA	58
4.1. Descrição do método	58
4.2. Metodologia	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1. Método construtivo do conduto de adução da CGH Alagoa 2 por condutos metálicos e implicações no trecho do penhasco	60
5.2. Método construtivo do túnel de adução em baixa pressão no trecho do penhasco da CGH Alagoa 2 e suas implicações	67
6. CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das fontes de eletricidade utilizadas no Brasil	24
Figura 2 - Arranjo de uma CGH do tipo fio d'água	30
Figura 3 - Visualização do barramento, da vazão ecológica, da tomada de água e do começo do sistema de adução em baixa pressão	31
Figura 4 - Visualização da chaminé de equilíbrio, do conduto de alta pressão e da casa de força	32
Figura 5 - Localização da cidade de Alagoa, no Estado de Minas Gerais, local da implantação da CGH Alagoa 2 e da área de estudo	38
Figura 6 - Acessos à cidade de Alagoa/MG	39
Figura 7 - Acessos e logística à CGH Alagoa 2 a partir da cidade de Alagoa/MG	40
Figura 8 - Área de drenagem da CGH Alagoa 2 e o local do eixo de barramento	41
Figura 9 - Ilustração das principais estruturas geológicas	43
Figura 10 - Mapa tectônico da transição entre a Faixa Brasília meridional e o segmento central da Faixa Ribeira	44
Figura 11 - Mapa geológico da área de Alagoa, sul do Estado de Minas Gerais, local onde foi realizado o estudo de caso	45
Figura 12 - Ortognaisse migmatítico I	46
Figura 13 – Ortognaisse migmatítico II	47
Figura 14 - Rocha apresentando estrutura gnáissica bandada	48
Figura 15 - Intrusão de leucogranito acompanhando a foliação tectônica de textura equigranular e granulação fina	49
Figura 16 - Dique de leucogranito equigranular de granulação final, cortando as demais unidades	49
Figura 17 - Principais zonas de cisalhamento existente na área e o sentido do cavalgamento	50
Figura 18 - Áreas de instabilidade e fluxos gravitacionais	51
Figura 19 - Dobras do maciço rochoso	53
Figura 20 - Dobras no trecho do penhasco	53
Figura 21 - Direções preferenciais do fraturamento do maciço no desemboque do túnel ...	54
Figura 22 - Direções preferenciais do fraturamento no trecho do penhasco, onde foi	

executado o túnel de adução	55
Figura 23 - Modos de propagação de fratura e modelagem das tensões aplicadas	56
Figura 24 - Seção de resistividade elétrica da área de implantação do túnel	56
Figura 25 - Traçado do conduto de baixa pressão previsto no início da implantação da CGH Alagoa 2	60
Figura 26 - Traçado do conduto de baixa pressão após o túnel (projeto executado)	61
Figura 27 - Supressão de vegetação e mobilização de terra para passagem do conduto no trecho do penhasco e suas proximidades	62
Figura 28 - Carreamento de sedimentos após período chuvoso nas proximidades do trecho do penhasco	62
Figura 29 - Vista aérea do conduto de baixa pressão	63
Figura 30 - Pedra que deslizou para próximo do leito do rio Aiuroca	63
Figura 31 - Blocos e sedimentos que rolaram após detonações e reentrâncias criadas no maciço	64
Figura 32 - Vista aérea da escavação em rocha no trecho do penhasco, nota-se a grande quantidade de matéria em suspensão	64
Figura 33 - Perfurações sendo realizadas horizontalmente	66
Figura 34 - Perfurações sendo realizadas horizontalmente e sem uma malha adequada	66
Figura 35 - Plano de fogo I	68
Figura 36 - Plano de fogo II	69
Figura 37: Túnel adutor e ligação ao conduto	72
Figura 38 - Perfil geológico do túnel e sua compartimentação geomecânica	72
Figura 39 - Traçado do túnel executado e traçado do conduto metálico conforme projeto inicial no trecho do penhasco	73
Figura 40: Geometria adotada para a escavação do túnel	73
Figura 41 - Traçado do túnel executado e traçado do conduto metálico conforme projeto inicial no trecho do penhasco	74
Figura 42 - Área de empréstimo para transbordo dos resíduos rochosos retirados do túnel	75
Figura 43 – Resíduos de rocha originados da limpeza do piso do túnel	75
Figura 44 – Restauração de estrada na zona rural do município de Alagoa/MG	76
Figura 45 – Construção de aterro para conformar erosão.....	76
Figura 46 – Doação de resíduos para munícipe	77

Figura 47 – Conduto externo acessando o túnel através do emboque de montante	82
Figura 48 – Desemboque de jusante e término do circuito de adução em baixa pressão ligando o conduto à chaminé de equilíbrio	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil em Megawatts (MW)	28
Tabela 2 - Escala de impactos ambientais	77
Tabela 3 - Principais impactos gerados na área de estudo	78
Tabela 4 – Matriz de comparação entre os impactos ambientais causados pelo conduto de baixa pressão no trecho do penhasco e via túnel	80

1. INTRODUÇÃO

O mundo está em constante evolução e a energia elétrica é um condutor essencial para propiciar e atender às conveniências humanas, que com um crescimento de mais de seis vezes nos últimos dois séculos, conforme destaca Khokhar e Kashiwase (2015) apud Mesquita (2022), necessitará de um maior controle da exploração e uso da energia distribuída universalmente na natureza.

Diante desta mesma perspectiva, Alves (2022) estima que o Brasil terá um pico populacional de 233 milhões de pessoas no ano de 2047, quando então as taxas de natalidade e mortalidade deverão se equilibrar e a população brasileira, que estará mais envelhecida, entrará em declínio, representando um fenômeno sincrônico ao desenvolvimento.

As taxas de mortalidade deverão cair devido a um padrão nutricional mais rico, a condições mais adequadas de higiene e saneamento básico e, ainda, pelo avanço da medicina e da garantia de acesso ao sistema de saúde. Por sua vez, o declínio da natalidade dar-se-á devido à elevação da renda, o crescimento do nível educacional, o aumento de trabalho assalariado (fruto da industrialização e da urbanização), o acesso da mulher no mercado de trabalho, o fortalecimento da autonomia feminina e redução das desigualdades de gênero, a ampliação e a diversificação do padrão de consumo, a expansão do sistema previdenciário, a divulgação e facilitação de acesso aos métodos contraceptivos e a garantia dos direitos sexuais e reprodutivos (ALVES, 2022).

Por consequência, esta invasão humana gradativa e desordenada irá requerer uma maior e significativa produção de energia para suprir os bens de serviço e a economia, bem como garantir o bem-estar da população.

Segundo Brasil (2022), a distribuição das fontes da matriz de eletricidade brasileira é: 53,4% de fonte hídrica, 12,8% gás natural, 10,6% eólica, 8,2% biomassa, 3,5% derivados de petróleo, 3,4% eletricidade importada, 3,4% carvão e derivados, 2,5% solar e 2,2% nuclear. Estes valores deixam evidente que a energia hidrelétrica ainda é a espinha dorsal do setor de geração de eletricidade do Brasil, sendo um recurso vantajoso quanto à diminuição dos riscos causados pela liberação de gases que causam o efeito estufa. Entretanto, mesmo diante de vantagens, a produção de hidroeletricidade

é extremamente dependente do clima, sendo que severas secas expõem há anos a fragilidade do sistema.

Conforme foram instaladas as usinas hidrelétricas, inúmeros impactos ambientais, sociais e econômicos surgiram. Tais impactos relacionam-se desde à alteração da dinâmica do rio, assim como a alterações na qualidade da água e reorganização de comunidades afetadas na região de implantação do projeto (SOUSA, 2000).

É neste panorama que surge a necessidade de gerar eletricidade de forma sustentável, analisando os danos ambientais, bem como sociais, econômicos e culturais.

Segundo esta nova tendência é que surgem as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), sendo pequenos empreendimentos hidrelétricos com geração de até 5MW, que possuem como características principais, segundo a ABRAPCH - Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras Hidrelétricas (2014), pequeno prazo para a implantação e baixo custo do empreendimento, além de reduzirem os impactos devido à menor escala de sua construção.

As CGHs possuem em seu arranjo típico a não dependência de reservatório para a geração de energia, sendo a vazão do rio suficiente para atender as demandas.

Dentro do arranjo das CGHs, também podemos citar os túneis que são capazes de transpor obstáculos relacionados às áreas com condicionantes fisiográficas de difícil acesso, ou mesmo regiões com características geológico-geotécnicas desfavoráveis para a execução de condutos.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar e qualificar os impactos ambientais, econômicos e sociais referentes à construção do túnel da implantação da CGH Alagoa 2, visto que este não estava previsto no projeto inicial.

No referencial teórico do presente trabalho é possível aprofundar os conhecimentos sobre o cenário energético no Brasil e a energia hidrelétrica do Brasil, temas que foram superficialmente abordados nesta introdução.

Para melhor compreensão sobre o que é uma CGH e sua relevância, o referencial teórico apresenta informações para a elucidação e visualização do leitor. Além disso, apresenta esclarecimentos sobre túneis de adução.

Ainda no referencial teórico, é apresentada a caracterização da área de estudo, com a sua localização e geologia, bem como os principais dados dos relatórios geológicos-geotécnicos elaborados inicialmente para a implantação de conduto metálico

em toda a extensão de adução de baixa pressão e, posteriormente, para a construção do túnel de adução.

Em seguida, o trabalho apresenta o método e a metodologia utilizada para que se obtivessem os dados, informações e resultados especificados.

Já nos resultados finais, são apresentados os métodos construtivos utilizados no projeto inicial e no projeto final, comparando os impactos ambientais ocasionados por cada um.

Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas pelo autor.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Apresentar e qualificar os impactos ambientais, econômicos e sociais do arranjo prévio, por condutos metálicos, e do arranjo final, por túnel de adução em baixa pressão no trecho do penhasco da CGH Alagoa 2.

2.2. Objetivos específicos

Descrever as CGHs e apresentá-las como empreendimentos de menor impacto ambiental e social;

Analisar a concepção prévia do planejamento e implantação do sistema de adução por condutos metálicos em vista das condicionantes geológico-geotécnicas no trecho do penhasco;

Analisar e verificar o contexto final do sistema de adução com a execução do túnel;

Apontar os benefícios que poderiam ocorrer na adução em túnel se este tivesse sido concebido desde o projeto básico ou inicial da CGH Alagoa 2;

Qualificar e estimar os resíduos rochosos do túnel;

Relatar a destinação final e as aplicações do resíduo rochoso da construção do Túnel de adução da CGH Alagoa 2.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. O cenário energético no Brasil

A eletricidade começou a ser implementada no Brasil no século XIX, sendo que, até o final daquele século, a energia elétrica era gerada por alternativas fósseis e queima de madeira, a exemplo da Europa e dos Estados Unidos (LORENZO, 1993).

O primeiro registro do uso de eletricidade no Brasil data do ano de 1852, quando foi inaugurado o telégrafo, o qual usava eletricidade de origem térmica (VAZ in CELESTINO et al. 2006).

No ano de 1883, segundo Oliveira (2018), é construída no rio Jequitinhonha, a primeira barragem hidrelétrica do Brasil, denominada Ribeirão do Inferno, com a finalidade de abastecer o garimpo existente nesta localidade, nos arredores de Diamantina/MG.

Logo após, em 1889, em Juiz de Fora, foi construída a UHE Marmelos-Zero, o primeiro empreendimento de grande porte da América do Sul com capacidade de geração de 250KW e, cuja finalidade, era abastecer as ruas e residências de Juiz de Fora (SOARES et al. 2022).

Deste modo, a origem do setor elétrico brasileiro se constituiu através de duas fontes principais de energia: a fóssil e a hidrelétrica. Por sua vez, a geração e a distribuição da energia eram realizadas por pequenas empresas privadas nacionais e empresas de governos municipais (LORENZO, 2002).

Este cenário de pequenas empresas se estende até o início do século XX, que é fortemente marcado pela chegada das primeiras concessionárias estrangeiras, e o avanço técnico do setor, com relativo aumento da produção de energia elétrica, possibilitando o consumo, tanto urbano, como industrial, nas regiões próximas às áreas centrais geradoras de energia elétrica, como é o caso de São Paulo e a construção da UHE Parnaíba, no rio Tietê, sendo esta composta de barragem com mais de 15m de altura, o que foi um marco para o setor (SOARES et al. 2022). Destaca-se também a UHE de Fontes, no Ribeirão das Lajes, inaugurada em 1908, que forneceu 24.000 kw à cidade do Rio de Janeiro/RJ (VAZ in CELESTINO et al. 2006).

Por sua vez, o período de 1920 até 1930 é marcado pelo nascimento das indústrias, o êxodo rural, os bens de serviço, a expansão urbana e ferrovias que foram fortemente influenciados pela atividade cafeeira no Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, onde fora de suma importância para a consolidação da eletricidade no Brasil, tanto na sua geração, através de novas hidrelétricas, como distribuição (SAES, 1986 apud SOARES et al. 2022).

Em 1954 é criado o plano de eletrificação que dá origem ao Fundo Federal de Eletricidade (FFE) e a ampliação da geração e da distribuição que culmina com a criação da Eletrobras em 1961 (LORENZO, 2002).

A partir de 1964, os militares assumem o poder e estabelecem por definitivo a presença do Estado no setor elétrico brasileiro, marcando um período muito correlato ao da década de 1950, com substituições das importações e ampliação do Estado nas atividades econômicas, com consequente modernização das empresas estatais, aliadas à obtenção favorável de empréstimos do mercado financeiro internacional, marcando um período de desenvolvimento acelerado da infraestrutura e, consequentemente, do setor elétrico nacional, conhecido como o “milagre brasileiro” (LORENZO, 2002).

O setor elétrico brasileiro cresceu muito bem e com ampla capacitação da engenharia de projetos do Brasil até a metade da década de 1970, período marcado negativamente pelo desfavorável cenário internacional proporcionado pelos choques do petróleo ocorridos em 1973 e 1979, período que traz graves consequências para o setor (LORENZO, 2002).

Em 1978 foi iniciada a construção da UHE de Itaipu, no Rio Paraná, com potência instalada de 14.000 MW e localizada entre as cidade de Foz do Iguaçu/PR e Ciudad el Este, no Paraguai. Acrescenta-se que o empreendimento contou com a escavação de 5.691m de túneis (VAZ in CELESTINO et al. 2006).

A década de 1980, através do plano de expansão de energia elétrica, priorizou o início de novas obras, porém, este período é marcado pelo conflito entre os interesses do poder central, representado pela Eletrobras, e empresas estaduais, ocasionando diversos tipos de transtornos para o setor elétrico, tais como a elevação dos custos operacionais e alteração no planejamento de obras em andamento. Ademais, os anos 80 foram fortemente afetados pelo endividamento interno e externo do Brasil, provocando uma gradativa perda de produtividade do setor elétrico brasileiro (LORENZO, 2022).

O início dos anos 90 foi conturbado por uma alta e incontrolada inflação, um baixo crescimento da economia e escassez de oferta de energia, fatores estes relevantes que desencadeiam a desestatização do setor elétrico do Brasil, como tentativa de captar recursos, assim como regulamentar tarifas e condições mínimas de investimento (LORENZO, 2002).

Em 1997 foi promulgada a Lei nº 9.478/1997, que dispõe sobre a política energética nacional estabelecendo diretrizes ao setor como a valorização dos recursos energéticos, a proteção do meio ambiente, a melhor forma de se explorar os recursos energéticos, entre outras.

No começo do novo milênio, o Brasil possuía uma matriz de energia elétrica, majoritariamente advinda do setor hidrelétrico, aliada a uma população crescente já com 170 milhões de pessoas e um consumo de energia três vezes maior do que o da década de 1970, enfrentando um longo período de escassez de chuvas, que culminou com o racionamento de energia e um período marcado por apagões e desaceleração da economia (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

A partir desta crise, se tornam notáveis as falhas de planejamento a longo prazo do setor energético brasileiro e, com isso, em 2004, um novo modelo institucional foi elaborado através da Lei nº 10.848/2004, visando melhorar embates relativos ao monitoramento, planejamento e comercialização da energia no Brasil (BRASIL, 2006).

Acrescenta-se que, neste período pós apagão, ocorre uma diversificação da matriz energética nacional, majoritariamente constituída por fontes hidrelétricas, que passa a ser complementada através de fontes renováveis, sobretudo a biomassa e a eólica, marcando um importante passo para o crescimento com sustentabilidade da matriz energética do Brasil (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Com a regulamentação do setor, após 2004, fica característico no cenário nacional os leilões de energia, destacando-se em 2007 o leilão de “energia limpa”, que contemplou, desde as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), até às termoeletricas por biomassa com o uso do bagaço da cana-de-açúcar, entre outros.

A partir de 2006, o Plano Decenal de Expansão da Energia (PDE) e o Plano Nacional de Energia Elétrica (PNE) são elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), procurando dar maiores subsídios e informações a curto e longo prazo para o planejamento do setor energético do Brasil (BRASIL, 2006).

Os anos subsequentes à criação do PDE sempre foram marcados pela presença anual deste informativo, onde se pode verificar a expansão do setor e demais itens associados, como investimentos, crescimento populacional, oferta e consumo de energia nas diferentes regiões, além de variações do Produto Interno Bruto (PIB), entre tantas outras atividades, como consumo e emissões de gases pelo efeito estufa, que passam a dar diretrizes e balizamentos para o setor energético nacional.

Por fim, cabe ressaltar que, de acordo com os relatórios do Plano Decenal de Expansão (PDE) de 2015 a 2031, o Brasil se tornará exportador de petróleo através do pré-sal e diversificará, de forma gradativa, suas fontes de energia renovável. Dentre essas fontes, destacam-se o crescimento da eólica e da solar, além de outras fontes, como a de biomassa e as PCHs. No mais, também ocorrerá o desenvolvimento do gás natural e dos biocombustíveis, além da recente utilização do hidrogênio como fonte alternativa de energia. Acrescenta-se que o hidrogênio, também chamado de hidrogênio verde, é produzido a partir da eletrólise da água, sendo apontado como uma fonte de energia renovável com grande potencial (BRASIL, 2022).

3.2. A energia hidrelétrica no Brasil

Segundo Soares et al. (2022), a história do desenvolvimento do setor hidrelétrico brasileiro é dividido em cinco fases: Nascimento do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) (1883 – 1930); Subdimensionamento do SEB e estatização de setor hidrelétrico brasileiro (1931 – 1955); O Plano de Metas (1956 – 1965); A era de ouro do setor hidrelétrico brasileiro (1966 – 1985); Nova república, novo paradigma; “A crise do Apagão de 2001” (1985-atual).

A primeira fase é marcada, de acordo com Lorenzo (1993), com a compreensão e entendimento da vastidão da malha hidrográfica do país. Diante deste contexto, surgem as primeiras usinas hidrelétricas do Brasil, bem como a primeira legislação nacional sobre energia elétrica, todas motivadas pelo aproveitamento hidrelétrico (CORRÊA, 2005). Assim, as cidades começam a desfrutar dos bens elétricos através de serviços de iluminação pública, bondes, telégrafos e, mesmo o uso residencial (OLIVEIRA, 2018).

Por sua vez, a segunda fase é afetada por uma grande crise energética ocorrendo racionamento de eletricidade e um cenário de incertezas políticas provocando

reformulações no SEB e a criação do “Código de Águas” com a finalidade de sistematizar e facilitar a exploração do grandioso potencial hidroenergético do país, atuando na revisão e incorporação ao patrimônio das concessões de exploração e serviços do setor elétrico brasileiro (PEREIRA, 2006).

A terceira fase é marcada pelo Plano de Metas de Juscelino Kubitschek, no qual foram destinados investimentos para ampliar a potência operativa do SEB, o qual dobrou em 10 anos a sua capacidade. Nesse período, ficou marcada a construção de diversas usinas hidrelétricas, como a UHE Paulo Afonso, no Nordeste; UHE Salto Grande de Santo Antônio, UHE Três Marias e UHE Furnas, em Minas Gerais; UHE Jurumirim, no estado de São Paulo; UHE Jacuí, no estado do Rio Grande do Sul; entre outras (SOARES et al. 2022).

A quarta fase, denominada era de ouro do SEB, de acordo com Lorenzo (2002), é favorecida por um aumento significativo do Sistema Elétrico Brasileiro que, com mais de 90% da eletricidade sendo gerada por fontes hídricas, foi de suma importância para superar a crise do petróleo. Novos consórcios de prospecção de potenciais hidroenergéticos foram contratados no período do regime militar e foram executados grandes projetos, como o de Ilha Solteira, no estado de São Paulo, Sobradinho, no estado da Bahia, a já citada Itaipu, além de Serra da Mesa, no estado de Goiás, que somente foi inaugurada em 1998.

Cabe destacar neste período, a construção em 10 anos de 61 hidrelétricas de grande porte e o crescimento de 405,15% da capacidade instalada do setor em 20 anos, fortalecendo o sistema elétrico nacional (SOARES et al. 2022).

Durante esse período, diante da construção das barragens e da consolidação do modal hidrelétrico no Brasil, preocupações relativas ao meio ambiente são evidenciadas e discutidas. Inclusive, através da Lei nº6.938, de 1981, é instituída a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), o Sistema Nacional do Meio Ambiente e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), colocando o Brasil numa situação de Vanguarda em nível mundial perante a regulamentação ambiental (SOARES et al. 2022).

Após décadas investindo em empreendimentos de grande magnitude, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), no ano de 1982, cria o Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCH), com o objetivo de fomentar e reorientar o setor hidrelétrico nacional, através de empreendimentos de

escala reduzida e menores repercussões socioambientais (BRASIL, 1982 apud SOARES et al. 2022).

Por fim, segundo Soares et al. (2022), a quinta fase foi um período evidenciado pela redemocratização do Brasil e maior debate dos aspectos socioambientais. Dentre os fatos que engendram o mencionado debate, os mais notáveis são as expropriações ocasionadas pelo reservatório de Itaipu (1975-1982), que causou a retirada de quarenta e três mil pessoas; os milhares de imóveis desapropriados para a formação do reservatório de Brumadinho (1971-1980); e, ainda, o rompimento da barragem da UHE de Euclides da Cunha, ocorrido em 1977, na cidade de São José do Rio Pardo/SP, considerado como o maior acidente com hidrelétricas no Brasil.

Diante de um panorama desfavorável, se faz necessário pensar em novas estratégias para a expansão do setor hidrelétrico brasileiro, principalmente, no que se refere à diminuição dos impactos ambientais e sociais ocasionados por tais empreendimentos. Frente a esta situação, a portaria do DNAEE nº136/1987 flexibiliza a Resolução do CONAMA nº01/1981, fixando que estão sujeitos ao licenciamento ambiental somente os empreendimentos com geração superior a 10MW, ocasionando um fomento no modal hídrico, no tocante à construção de PCHs (SOARES et al. 2022).

Com a contração do setor hídrico por falta de investimentos e inúmeros problemas socioambientais em relação às novas construções de UHEs, o setor entra em declínio. Porém, no processo de desestatização, através da Lei Federal nº 9.074/95, ocorre a reinserção, em 1995, após seis décadas, da figura do produtor independente de energia elétrica, notabilizando a volta da iniciativa privada e também estrangeira no cenário brasileiro (SOARES et al. 2022).

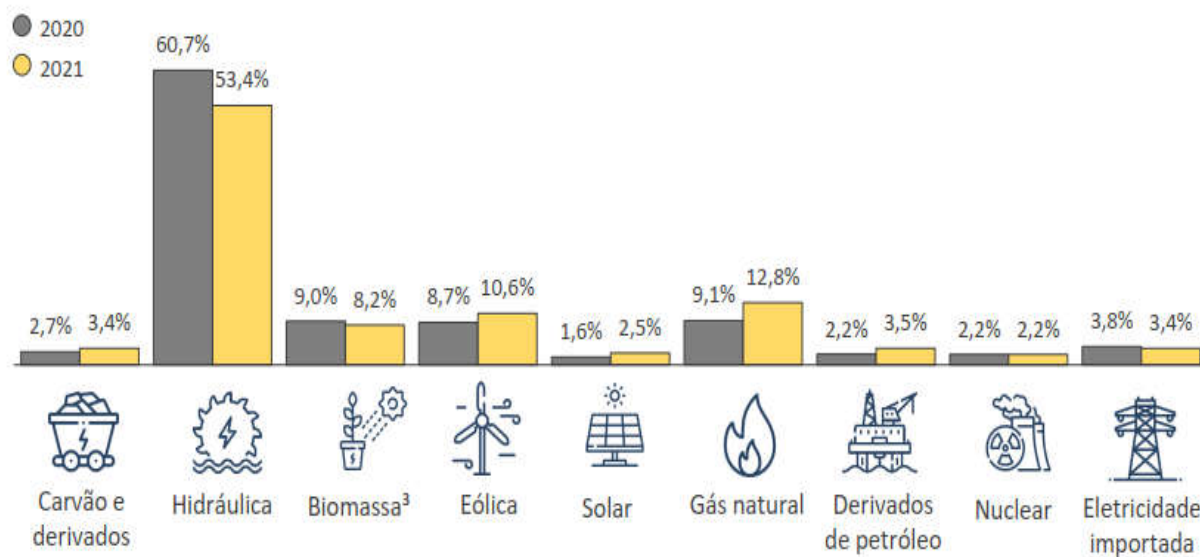
A Lei nº 9.074/95 criou uma nova classificação para os pequenos empreendimentos hidrelétricos, as chamadas CGHs, que, originalmente, em seu artigo 8º, dispensou de concessão, permissão ou autorização o aproveitamento de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1MW. Atualmente, após alteração promovida pela Lei nº 13.360/16, estão dispensados de concessão, permissão e autorização os empreendimentos hidrelétricos com aproveitamento de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 5MW.

Deste modo, segundo Makaron (2012), as PCHs e CGHs acabam por se tornar empreendimentos atrativos com características importantes para a complementação da

matriz energética, além de seus impactos ambientais e sociais reduzidos, de menor amplitude e magnitude quando comparados às UHEs.

Por sua vez, a Lei nº 9.427/96, após alteração promovida pela Lei nº 13.360/16, classifica como CGH os empreendimentos hidrelétricos com capacidade de geração de energia elétrica de até 5MW e PCHs os que possuem capacidade de geração de 5MW até 30MW.

Importante pontuar que, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022 (BRASIL, 2022), em 2021 houve uma queda na produção de energia hidrelétrica devido à escassez das chuvas, havendo uma nova configuração da participação da energia hidrelétrica na oferta de energia, conforme a Figura 1:



2021 (TWh)
 Oferta Total: 679,2
 Oferta hidráulica: 362,8

2020 (TWh)
 Oferta Total: 653,5
 Oferta hidráulica: 396,4

↑ Aumento de 3,9%
da Oferta Total

↓ Redução de 8,5%
da Oferta hidráulica

Figura 1 - Distribuição das fontes de eletricidade utilizadas no Brasil

Fonte: Brasil (2022).

Entretanto, ainda com a redução da oferta de energia hidráulica de aproximadamente 8,5%, ainda há uma representatividade absoluta do setor na oferta de energia.

3.3. Central Geradora hidrelétrica e o novo cenário energético nacional, arranjo de seus componentes e impactos associados

Segundo Fernandes (2019), as CGHs são mini usinas hidrelétricas a fio d'água, sem reservatório e que aproveitam a queda natural do rio para a geração de energia elétrica. As CGHs possuem potência reduzida de até 5MW e são construções que possuem uma menor burocracia para a sua concepção, pois dispensam de concessão, permissão ou autorização, sendo apenas encaminhadas à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), estando estas sujeitas a basicamente os procedimentos relativos do licenciamento ambiental, conforme artigo 8º, caput, da Lei nº 9.074/95:

Art. 8º. O aproveitamento de potenciais hidráulicos e a implantação de usinas termoeletricas de potência igual ou inferior a 5.000 kW (cinco mil quilowatts) estão dispensados de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente. (BRASIL, 1995).

Considerando esta situação e o reduzido potencial de impacto gerado por estas obras, sugere-se que existam maiores facilidades. Ressalta-se que, conforme mencionado, as CGHs estão dispensadas de concessão, permissão ou autorização, sendo necessário apenas o seu registro nos órgãos competentes, o que torna menos burocrático e mais rápida a sua liberação se comparadas a outros tipos de empreendimentos do setor hidrelétrico.

Segundo a ABRAPCH (2014), pelo fato das CGHs possuírem uma estrutura reduzida e de custo muito inferior, elas favorecem a descentralização da produção de energia, tornando possível a participação de investidores privados no setor. Deste modo, os investimentos em pequenas hidrelétricas passam a ser fundamentais para o equilíbrio energético nacional colaborando na redução de tarifas ao eliminar as indesejáveis bandeiras tarifárias, principalmente em períodos de seca.

As CGHs, em suma, segundo a ABRAPCH (2014), são empreendimentos com geração próxima à carga, ocasionando redução de perdas, assim como menores investimentos na transmissão, sendo importantes para levar energia para pequenas

idades e regiões rurais, possuem pequeno prazo para a implantação, geram empregos, além de serem investimentos seguros, sustentáveis e com tecnologia nacional.

Em 2021, foi promulgada a Lei nº 14.182/2021, que tratou sobre a desestatização da Eletrobras, com a finalidade de capitalização de recursos e melhoria da oferta de serviço energético. A mencionada lei apresenta diversos requisitos para que a privatização da Eletrobras ocorra, a fim de garantir um maior benefício para a população e para a sobrevivência da empresa mediante essa transição. Dentre os requisitos, destaca-se que o artigo 21 da lei em questão destinou uma porcentagem mínima para a contratação de energia fornecida por CGHs nos Leilões A-5 e A-6, nos seguintes termos:

Art. 21. Os Leilões A-5 e A-6 deverão destinar, no mínimo, 50% (cinquenta por cento) da demanda declarada pelas distribuidoras à contratação de centrais hidrelétricas até 50 MW (cinquenta megawatts), até o atingimento de 2.000 MW (dois mil megawatts).

§ 1º Após a contratação dos 2.000 MW (dois mil megawatts) estabelecidos no caput deste artigo, o percentual de destinação deverá ser reduzido para 40% (quarenta por cento) da demanda declarada pelas distribuidoras dos Leilões A-5 e A-6 realizados até 2026.

§ 2º As contratações estabelecidas no caput deste artigo serão por 20 (vinte) anos, ao preço máximo equivalente ao teto estabelecido para geração de PCH do Leilão A-6 de 2019, atualizado esse valor até a data de publicação do edital específico pelo mesmo critério de correção do Leilão A-6 de 2019.

§ 3º Os leilões de que trata o caput deste artigo deverão ter critérios de contratação que priorizem, preferencialmente, os Estados com maior número de projetos habilitados, não podendo nenhum Estado ter mais de 25% (vinte e cinco por cento) da capacidade total contratada.

§ 4º Os empreendimentos contratados nos leilões referidos no caput deste artigo não terão direito aos descontos previstos no § 1º do art. 26 da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. (BRASIL, 2021).

Desse modo, é possível vislumbrar que as CGHs se apresentam como um importante empreendimento para a oferta de eletricidade e contam com o fomento público, que atrai investidores e ainda apresentam benefícios para o meio ambiente e para os consumidores. É interessante mencionar que a recente publicação do portal do MME - Ministério de Minas e Energias (BRASIL, 2022), estipula que a conta de energia elétrica do consumidor, terá uma redução do valor de até 19% devido à desestatização da Eletrobras e consequentes medidas tomadas.

Conforme Tabela 1, pode-se verificar, segundo o Anuário Estatístico de 2021, com base no ano de 2020, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o

crescimento, desde 2016, dos empreendimentos do tipo CGH no Brasil que, de acordo com a ANEEL (2022), totalizam 729 CGHs ativas dispersas pelo país com um potencial instalado de 838.183,12 kW.

Tabela 1 -Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil em Megawatts (MW)

	2016	2017	2018	2019	2020	$\Delta\%$ (2020/2019)	Part. % (2020)	
Total	150.338	157.112	164.503	170.118	174.737	2,7	100,0	Total
Usinas Hidrelétricas	91.499	94.662	98.287	102.999	103.027	0,0	59,0	Hydropower Plants
PCH	4.941	5.020	5.157	5.291	5.429	2,6	3,1	SHP
CGH	484	594	695	768	816	6,2	0,5	CHG
Gás Natural	12.965	12.980	13.359	13.385	14.927	11,5	8,5	Natural Gas
Derivados de Petróleo	8.845	8.792	7.549	7.670	7.696	0,3	4,4	Petroleum Products
Carvão	3.389	3.324	2.858	3.228	3.203	-0,8	1,8	Coal
Usinas Nucleares	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	0,0	1,1	Nuclear Power Plants
Biomassa	13.913	14.289	14.569	14.703	15.011	2,1	8,6	Biomass
Usinas Eólicas	10.124	12.283	15.378	15.378	17.131	11,4	9,8	Wind Power Plants
Solar	24	935	2.473	2.473	3.287	32,9	1,9	Solar Power Plants
Outras	2.163	2.243	2.188	2.234	2.221	-0,6	1,3	Others

Fonte:BRASIL (2021).

A CGH do tipo fio d'água (Figura 2), possui um pequeno barramento apenas para garantir o nível mínimo de água para o funcionamento, utilizando toda água que chega para gerar energia, sendo composta basicamente por: sistema de captação, sistema de adução, casa de força e linha de transmissão (MERE, 2017).

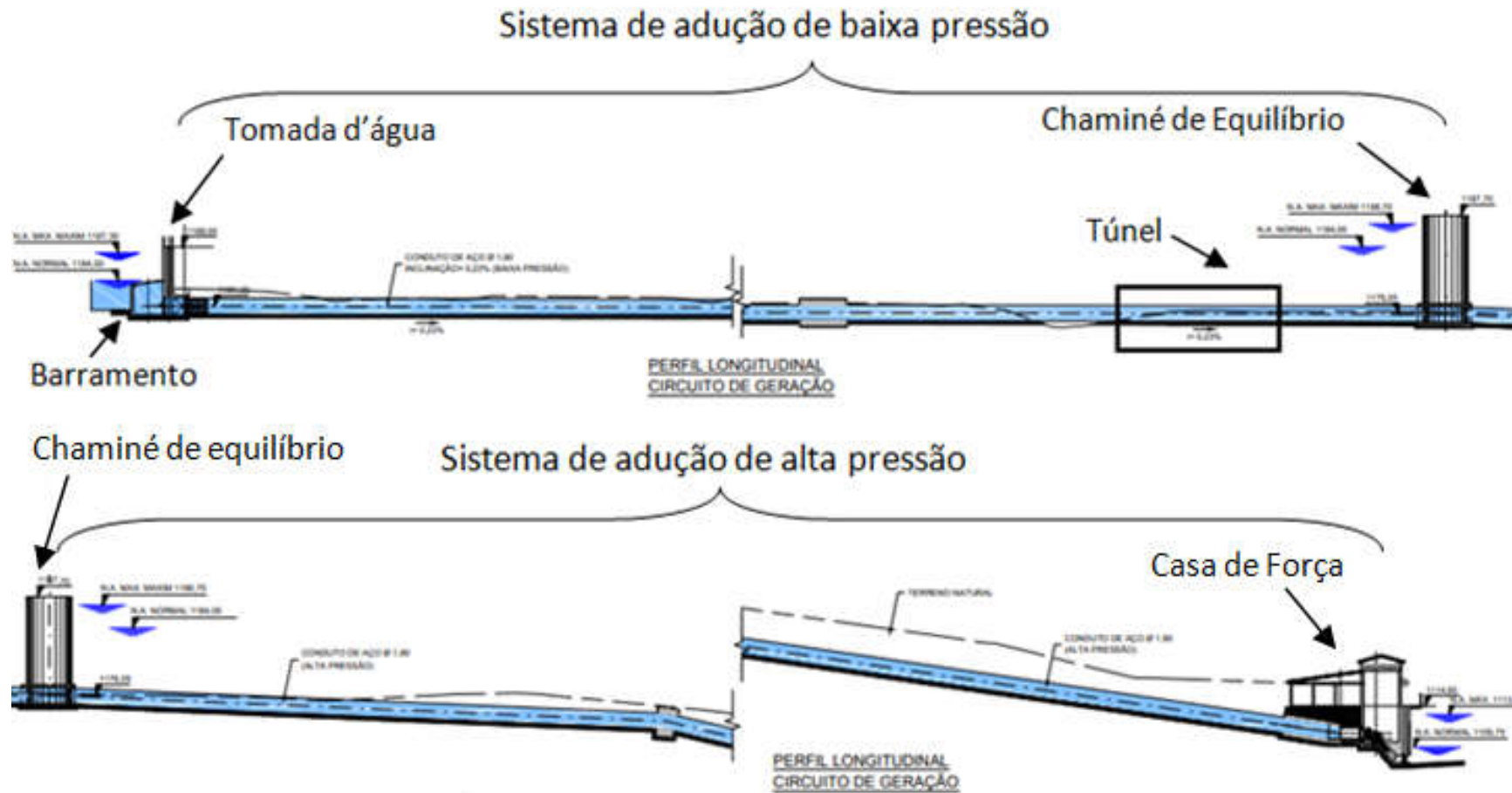


Figura 2 - Arranjo de uma CGH do tipo fio d'água
 Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Segundo Mere (2017), o sistema de captação de água de uma CGH possui uma barragem que forma um pequeno reservatório, o qual direciona toda a água para a tomada de água. No sistema de captação também há um sistema de vazão ecológica para manter o trecho de vazão reduzida em condições aceitáveis, garantindo um nível de água mínimo (Figura 3).

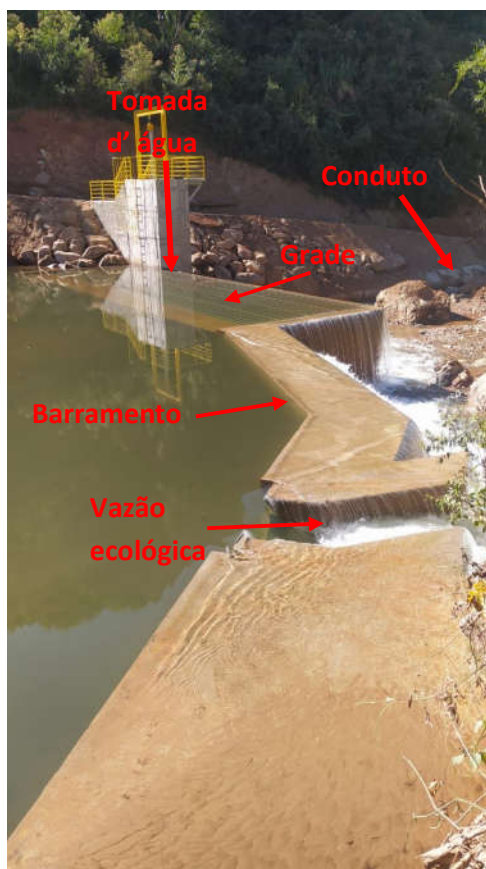


Figura 3 - Visualização do barramento, da vazão ecológica, da tomada de água e do começo do sistema de adução em baixa pressão

Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Por sua vez, conforme Mere (2017), o sistema de adução de uma CGH, em geral, possui uma adução em baixa pressão e uma adução em alta pressão. Usualmente, o conduto de adução em alta pressão é enterrado, sendo realizada a mobilização de terra através de cortes e reaterro. Em relação à adução em baixa pressão, o escoamento pode ser livre através de um canal ou ainda pode se dar através de tubulação ou túnel. No caso de escoamento livre, é utilizada uma câmara de carga entre a adução de baixa pressão e a de alta pressão e, quando se tratar de tubulação, é necessária uma chaminé de equilíbrio (Figura 4).



Figura 4 - Visualização da chaminé de equilíbrio, do conduto de alta pressão e da casa de força

Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Na Figura 4 ainda é possível observar a casa de força de uma CGH que, segundo Mere (2017), refere-se ao local onde estão instalados os equipamentos de geração de hidroeletricidade da CGH, sendo que sua construção deve observar um lugar apropriado onde a vazão máxima não possa alagar. Conforme Mere (2017), “na casa de força serão instaladas as turbinas, os geradores, os quadros e painéis, o sistema de proteção, o transformador e outros componentes da CGH”.

Por fim, a linha de transmissão é o componente responsável por transmitir a energia elétrica gerada pela CGH até o seu ponto de conexão, entrega ou consumo. A linha de transmissão é composta por cabos, isoladores e subestações (MERE, 2017).

Diante do exposto é importantíssimo entender que o projeto é a essência do empreendimento e que toda ideia de implantação de uma CGH ou PCH depende de uma minuciosa e criteriosa análise do conhecimento da área a qual será instalada para ser colocada em prática, ou seja, é fundamental conhecer o que cada área possui de ambiente natural desde a percepção da atmosfera (cenário das mudanças climáticas), da

hidrosfera, litosfera e biosfera ao ambiente social como infra-estrutura, material constituído pelo homem e os sistemas sociais criados (NILTON, 2009).

Segundo Sánchez (2013), confirmar e identificar os impactos ambientais de forma preliminar, a fim de prever a magnitude destes, é uma das funções dos estudos básicos, sendo válida a afirmação de que quanto mais se conhece um ambiente, maior também será a capacidade de se prever os impactos relacionados a este, gerenciando os projetos de modo a reduzir os possíveis impactos negativos.

Na implantação das CGHs, deve-se assegurar e considerar a existência de uma área de influência direta, onde os impactos poderão surgir conforme a instalação do empreendimento e sua ligação ao meio físico, social e biótico. Uma área indireta e também susceptível de acontecer impactos conjuntamente poderá surgir, de acordo com a instalação e operação do empreendimento. Esta área abrangerá desde a economia envolvida aos ecossistemas, na medida em que ocorrerão as alterações na área de influência direta. (DEMARCO; CANTONI; PASSINI, 2017).

Deste modo, cabe conceituar, de acordo com o artigo 1º da resolução do CONAMA nº 001/1986, que impacto ambiental é:

(...) qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I. a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II. as atividades sociais econômicas;
- III. a biota;
- IV. as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V. a qualidade dos recursos ambientais. (BRASIL, 1986, p. 01).

O conhecimento, de forma relevante e profunda, acerca dos impactos ambientais, em suas unidades físicas, biológicas e sócio-econômicas, da área de estudo, em suas diversas fases, como planejamento, construção, pré-operação e operação, é considerado como instrumento técnico-científico, capaz de definir, mensurar, monitorar, mitigar e corrigir as possíveis causas e efeitos de qualquer implantação, sendo este um instrumento multidisciplinar. (NILTON, 2009)

Enfim, segundo Demarco, Cantoni e Passini (2017), para a avaliação do impacto ambiental, existem diversos métodos que objetivam determinar os parâmetros de qualidade e quantidade de variáveis relacionadas a um projeto, porém não há um método capaz de cobrir todos os impactos ambientais gerados. No entanto, a elaboração

destes instrumentos e o seu entendimento visam melhorar os aspectos ambientais de um projeto.

3.4. Túneis de adução e implicações no contexto de uma CGH

Túneis são obras de arte civis que, desde a antiguidade, associam ousadia e inovação com a finalidade de se construir artificialmente uma passagem subterrânea, de forma a contornar obstáculos com segurança sem interferir ou perturbar a vida ou o tráfego da superfície (BALSUBRAMANIAN, 2014).

De modo geral, as estruturas subterrâneas, de acordo com Maidl (2013) apud Huymajer et al. (2022), podem ser categorizadas com base em sua finalidade, podendo estas acomodar, desde uma infraestrutura de transporte, como ferrovias ou estradas, dar acesso a minas e poços, além de abrigar linhas de energia ou mesmo adução, transportando água e esgoto, entre tantos outros serviços.

Segundo Telles in Celestino et al. (2006), as informações apontam que em 1860 foi construído o primeiro túnel no Brasil, o qual era um pequeno túnel rodoviário escavado em rocha na Rodovia União e Indústria, próximo à cidade de Três Rios (RJ), sendo que desapareceu poucos anos depois devido à construção da antiga Estrada de Ferro Dom Pedro II.

O histórico de túneis no Brasil, segundo Nunes e Rios Filho (2021), se transforma a partir do século 19 e se deve à visão modernista do Imperador Dom Pedro II, que dá início à expansão das estradas de ferro.

Conforme Telles in Celestino et al. (2006), em 1858 foi iniciada a obra da chamada segunda seção da Estrada de Ferro Dom Pedro II, a qual contou com a construção de 15 túneis, citando-se o conhecido Túnel Grande com 2.238 metros de comprimento. A perfuração do Túnel Grande foi concluída em 1864, sendo inaugurado em dezembro de 1865.

Em sequência, o Brasil passa a investir em túneis de diversas finalidades. Cita-se como exemplo a construção, entre 1911 e 1913, do túnel de adução executado em rocha, com 8,5Km de extensão, para desvio do Rio Pirai até o reservatório de Ribeirão das Lajes, no estado do Rio de Janeiro, para geração de energia e abastecimento de água (NUNES; RIOS FILHO, 2021). Tal obra ficou conhecida como túnel de Tocos, sendo a

primeira vez que se utilizou de uma obra subterrânea para a geração de eletricidade (VAZ in CELESTINO et al. 2006).

O túnel de Tocos representou um grande desafio para época, sendo considerada uma das mais importantes construções subterrâneas daquele período. Ademais, por muito tempo lhe foi atribuído o título de túnel mais longo do Brasil (VAZ in CELESTINO et al. 2006).

Por sua vez, entre 1936 a 1938, foi construído o primeiro túnel rodoviário de São Paulo, o Túnel Daher Elias Cutait, conhecido como Túnel 9 de Julho, com 450 metros de extensão, cuja obra foi executada com técnica a céu aberto de túnel invertido e utilizado o Austrian Tunnelling Method (ATM), que no Brasil é conhecido como Método Austríaco para Abertura de Túneis (NUNES; RIOS FILHO, 2021).

Por sua vez, os túneis de adução são de grande importância e há muito tempo são utilizados pelo homem, principalmente para o abastecimento de água, como é o caso do túnel de Jerusalém de 200m de extensão construído no ano de 700 a.C.(NUNES; RIOS FILHO, 2021).

Os túneis de adução são úteis para diversas finalidades, dentre elas para o aproveitamento hidrelétrico com o objetivo de minimizar a somatória de custos da estrutura e de perdas de energia (ELETROBRAS, *s.d.*).

De acordo com as diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas da Eletrobras (*s.d.*), que podem ser aplicadas analogamente às CGHs, a opção por um túnel de adução normalmente será assumida quando a topografia for desfavorável à adução em canal ou conduto de baixa pressão, quando a rocha no trecho a ser escavado for de boa qualidade, de baixa permeabilidade e sem suspeita de materiais erodíveis ou solúveis, quando houver uma cobertura suficiente de rocha ao longo do traçado do túnel e quando dispuser de necessidade e viabilidade econômica, frente a um maciço de boa qualidade a introdução neste de uma chaminé de equilíbrio.

Os túneis de adução devem ser dimensionados em sua geometria conforme a vazão da água; além disso, a ELETROBRAS recomenda, para o dimensionamento correto, a consideração do tamanho das máquinas que realizarão o trabalho de perfuração, desmonte, limpeza, entre outros serviços pertinentes à construção do túnel (ELETROBRAS, *s.d.*).

O dimensionamento dos túneis de adução de água deve respeitar critérios avaliados, de acordo com a velocidade do fluxo. Para túneis não revestidos, esta deve

ser da ordem de 2,5m/s, quando forem revestidos em concreto projetado, a água poderá atingir 3,0m/s e, nos casos do revestimento ser de concreto estrutural, esta poderá atingir velocidades da ordem de 4,5m/s (ELETROBRAS, *s.d.*).

Em nível de projeto, os túneis de adução poderão, inicialmente, não ser revestidos, de acordo com as condições mínimas de cobertura de rocha existente “in loco”, porém esta consideração é referente ao melhor custo e benefício do empreendimento, e deverá ser melhor verificada de acordo com a extensão e o diâmetro deste túnel, além de uma boa campanha de campo, sucedida de investigações geotécnicas, realizadas, de forma indireta, através de sondagens geofísicas não destrutivas e, de forma direta, através de sondagens rotativas, mistas, a percussão, entre outras, procurando sempre eliminar o risco e as surpresas do ambiente geológico.

Após realizado o projeto, no processo de escavação do maciço rochoso, é necessário que ocorra o Acompanhamento Técnico da Obra (ATO), o qual será responsável por verificar compatibilidades e também incompatibilidades de projeto, conforme os avanços da escavação. Deste modo, conforme a execução, será verificado o tipo de rocha e seus parâmetros geológicos e geotécnicos, observando, segundo determinados critérios, o grau de fraturamento da rocha, se existe alteração, sua persistência, coerência, condutividade hidráulica, além de feições estruturais como a disposição e espaçamento de falhas, juntas de alívio, condições das fraturas, intrusões, etc.(ELETROBRAS, *s.d.*).

Após esta análise detalhada, a frente de escavação do maciço rochoso será classificada, de acordo com métodos e critérios de classificação de maciço rochosos.

Mesquita (2008) salienta que os métodos de classificação geomecânica de maciços rochosos foram se ajustando e sofrendo modificações conforme o tempo, a experiência e o conhecimento adquirido como consequência do avanço e expansão das obras subterrâneas.

Guidicini, Mello e Carvalho (2022) relatam que, atualmente, os métodos de classificação de maciços rochosos na frente de escavação se encontram consolidados e os mais utilizados são: o sistema Q de classificação de maciços rochosos, desenvolvido por Barton, Lien e Lunde (1974), posteriormente modificado por Grimstad e Barton (1993); e o sistema Rock Mass Rating (RMR), desenvolvido por Bieniawski (1989).

De acordo com os avanços do túnel e a classificação do maciço, novas medidas poderão ser realizadas na execução do projeto, sempre na tentativa de se obter

segurança com qualidade, visando através das boas práticas de engenharia um melhor custo-benefício associado.

Durante o processo de escavação de um túnel, é notável que uma grande quantidade de material é gerada, sendo este resíduo um subproduto indesejável para a obra. Entretanto, em muitos casos, este resíduo pode ser tratado e processado e, assim, tornar-se de grande valia e, por muitas vezes, determinando aspectos econômicos e ambientais essenciais para o devido sucesso do empreendimento (VOIT; KUSCHEL, 2020).

Segundo Voit e Kuschel (2020), a estratégia de uma intensa reciclagem já foi implementada com sucesso na construção de alguns dos túneis mais longos no mundo, sendo um grande desafio, pois o material de escavação não é um agregado padrão, tendo qualidades e características geométricas, físicas e químicas diferentes ao longo do túnel, de acordo com a variação da geologia e também dos métodos de escavação.

A utilização do material de escavação vem sendo utilizada de diversas formas, conforme suas características, desde simples acessos à construção de estradas, ou mesmo usinas e barragens de concreto, de tal modo que a utilização dos materiais de escavação de um túnel pode levar à redução significativa de custos e emissões de gases causadores do efeito estufa (HUYMAJER et al. 2022).

Os túneis, de acordo com Gettinger, Egger e Goodfellow (2011), são obras consideradas caras pelo proprietário e, até mesmo, descartadas na etapa de projeto preliminar devido a um maior gasto inicial. Entretanto, quando se analisa detalhadamente e faz-se uma perspectiva a longo prazo, dentro de um ciclo de vida útil, a construção dos túneis e seus impactos ambientais se tornam menos onerosos.

3.5. Caracterização da área de estudo

3.5.1 Localização e apresentação da área de estudo

A Central Geradora Hidrelétrica Alagoa 2, está situada no município de Alagoa, que se localiza a uma latitude 22°10'14'' sul e a uma longitude 44°38'31'' oeste, conforme as Figuras 5, sendo este município pertencente ao estado de Minas Gerais em sua micro-região Sul-Sudeste, estando este inserido nas terras altas da cadeia

montanhosa da Serra da Mantiqueira localizando-se à 420 km da capital Belo Horizonte.



Figura 5 - Localização da cidade de Alagoa, no Estado de Minas Gerais, local da implantação da CGH Alagoa 2 e da área de estudo
 Fonte: IBGE, modificado (2022).

A cidade de Alagoa pode ser acessada pela BR-267 ao norte passando pela cidade de Aiuruoca/MG e ao Sul pela BR-354 passando pela cidade de Itamonte/MG. Pela BR-267, a partir de Aiuruoca/MG, o acesso para a cidade de Alagoa é realizado por estradas não pavimentadas na distância de trinta e um quilômetros. Já o acesso sul, pela BR- 354, vai até a cidade de Itamonte/MG e, a partir daí, segue por asfalto pela LMG-881 por trinta e oito quilômetros, sendo este pavimentado em partes até o presente momento. Na Figura 6, é possível observar os caminhos para chegar até a cidade de Alagoa/MG.



Figura 6 - Acessos à cidade de Alagoa/MG

Fonte: GOOGLE EARTH (2022), modificado.

A área de estudo, referente ao local da construção da CGH Alagoa 2, possui como referência de localização as seguintes coordenadas: 22°13'11,94"S e 44°39'31,87"O. Os acessos a partir da cidade de Alagoa estão representados na Figura 7, sendo estes realizados de duas formas: pelo trajeto em vermelho, passando pelo povoado do Prateado rumo à Serra dos Borges, trajeto este quase todo pavimentado, ou pelo trajeto em verde, por estrada de terra, que segue em seu traçado acompanhando o rio Aiuruoca. O caminho em vermelho é mais curto, porém possui alta declividade e é de difícil acesso para veículos maiores ou pesados. Já o trajeto em verde passa nas proximidades da comunidade do Rio Acima e o seu trajeto possui menor declividade e é mais acessível para veículos maiores, porém é mais longo.



Figura 7 - Acessos e logística à CGH Alagoa 2 a partir da cidade de Alagoa/MG
 Fonte: GOOGLE EARTH (2022), modificado.

A CGH possui potência final instalada de 3,0MW e foi implantada no Rio Aiuruoca, sub-bacia 61, no estado de Minas Gerais (WELT ENERGIA, 2016).

A bacia de contribuição da CGH Alagoa 2, conforme Figura 8, tem área de drenagem igual a 178,90 Km² e está instalada dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra da Mantiqueira. Ressalta-se que, não existe restrição ambiental para a instalação desse tipo de empreendimento na APA (WELT ENERGIA, 2016).

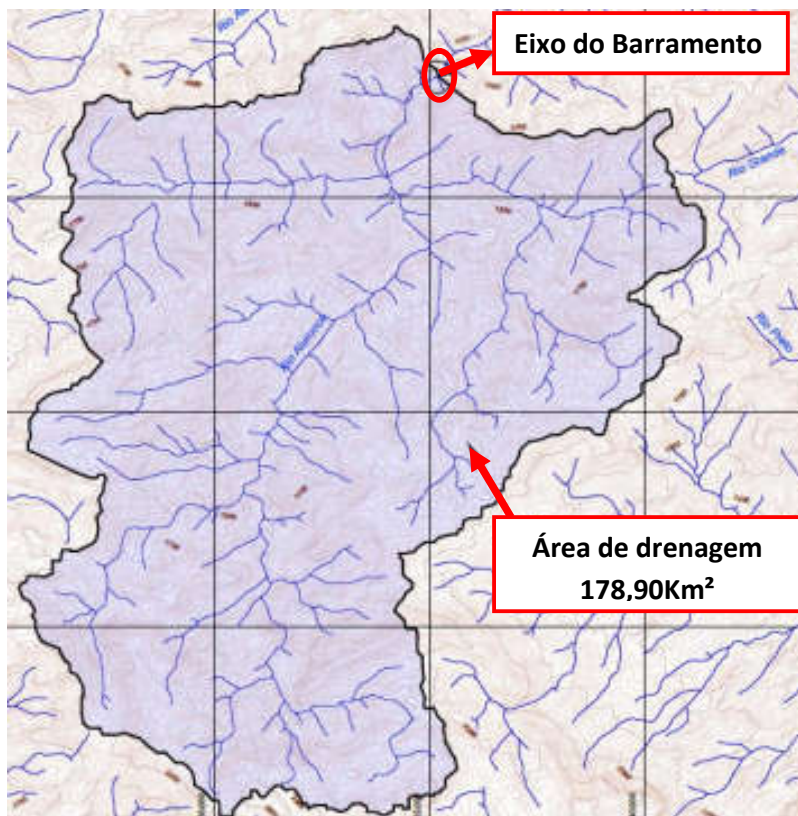


Figura 8 - Área de drenagem da CGH Alagoa 2 e o local do eixo de barramento
 Fonte: WELT ENERGIA(2016).

A CGH Alagoa 2 possui em seu arranjo uma seção de barramento principal, com nível de reservatório estabelecido na elevação 1.184m que fecha todo o vale do rio numa barragem de soleira vertente, garantindo assim a não formação de reservatório por verter o próprio aproveitamento. No barramento encontra-se um ressalto hidráulico submerso, estrutura localizada na entrada do canal de adução. Também no barramento foi executado um vertedor retangular que funciona com lâmina livre para estabelecer uma vazão constante de $47\text{m}^3/\text{s}$ no trecho de vazão reduzida, assegurando assim os níveis admitidos para a vazão ecológica no rio Aiuruoca (WELT ENERGIA, 2016).

Logo após o barramento começa o circuito de geração de energia elétrica que, no caso da CGH Alagoa 2, foi implantado na ombreira esquerda da barragem vertente. A tomada d'água, que atuará por gravidade e será equipada com uma comporta ensecadeira, começa com cota inferior da entrada de 1180,05m e superior de 1183,05m. No início do sistema de geração, perpendicular ao fluxo, encontra-se uma grade metálica cobrindo a caixa de adução que, por sua vez, guiará o fluxo d'água até a região

de emboque. Esta entrada será gradativamente reduzida até a seção de 1,90m para, assim, o fluxo adentrar no conduto forçado de baixa pressão (WELT ENERGIA, 2016).

Por sua vez, o conduto forçado de baixa pressão é constituído de tubulação de aço de 1,90m de diâmetro e tem extensão de cerca de 1.771,50m, sua geratriz superior está na cota 1.181,95m na tomada d'água, seguindo com declividade mínima de 0,23% até o túnel de adução (WELT ENERGIA, 2016). A partir de então, a adução será realizada por um túnel de adução de 216,40m que tem como cota de piso a elevação de 1.174,80m mantendo a adução por tubulações metálicas até os plugs de montante, situado a 17,5m do emboque do túnel, e do plug de jusante, situado a 45,50m do desemboque do túnel. Os plugs possuem 7m de comprimento e são peças de concreto armado que fazem a transição entre o conduto metálico, de 1,90m de diâmetro, e o túnel de seção em arco retângulo de 4,20m de base por 4,30m de altura, com área de 16,17m² (VALLEJOS, 2021).

O encerramento do conduto de baixa pressão é a chaminé de equilíbrio, situada a cerca de 65m do desemboque do túnel, e marca o final do conduto forçado de baixa pressão e o começo do conduto forçado de alta pressão, que tem uma extensão de 379m, com diâmetro de 1,90m, até a bifurcação, localizada antes da entrada da casa de força, onde, a partir daí, terá o seu diâmetro reduzido para 1,35m e percorrerá até a casa de força por aproximadamente 6,30m (WELT ENERGIA, 2016).

Finalizando o sistema de geração de energia elétrica encontra-se a casa de força e o canal de fuga. A casa de força encontra-se a aproximadamente a 30m da calha natural do rio Aiuruoca, possuindo como nível d'água normal de operação a elevação de 1.109,75 m, o que totaliza uma queda bruta de 74,25 m. Em seu interior, a casa de força abriga duas unidades geradoras do tipo Francis, com potência nominal unitária de 1,50MW. Por fim, dando continuidade à casa de força, está situado o canal de fuga com uma extensão de aproximadamente 21m (WELT ENERGIA, 2016).

3.5.2.Geologia regional da área de estudo

A área em que está inserido o túnel da CGH Alagoa 2 (Figura 9), segundo Trouw et al. (2013), se encontra dentro da zona de interferência tectono-metamórfica entre as faixas Brasília Sul e Ribeira, relacionadas à evolução neoproterozóico do evento termo-tectônico ou Orógeno Brasileiro (ETTB). As rochas geradas neste evento

margeiam a borda meridional do Cráton de São Francisco (Figura 10). Na região onde foi construído o túnel da CGH Alagoa 2 encontram-se rochas que pertencem à Megassequência Andrelândia e, deste modo, segundo Paula (2012), nesta região se encontram rochas migmatíticas associadas ao embasamento e leucogranitóides tardi a pós tectônico(Figura 11).

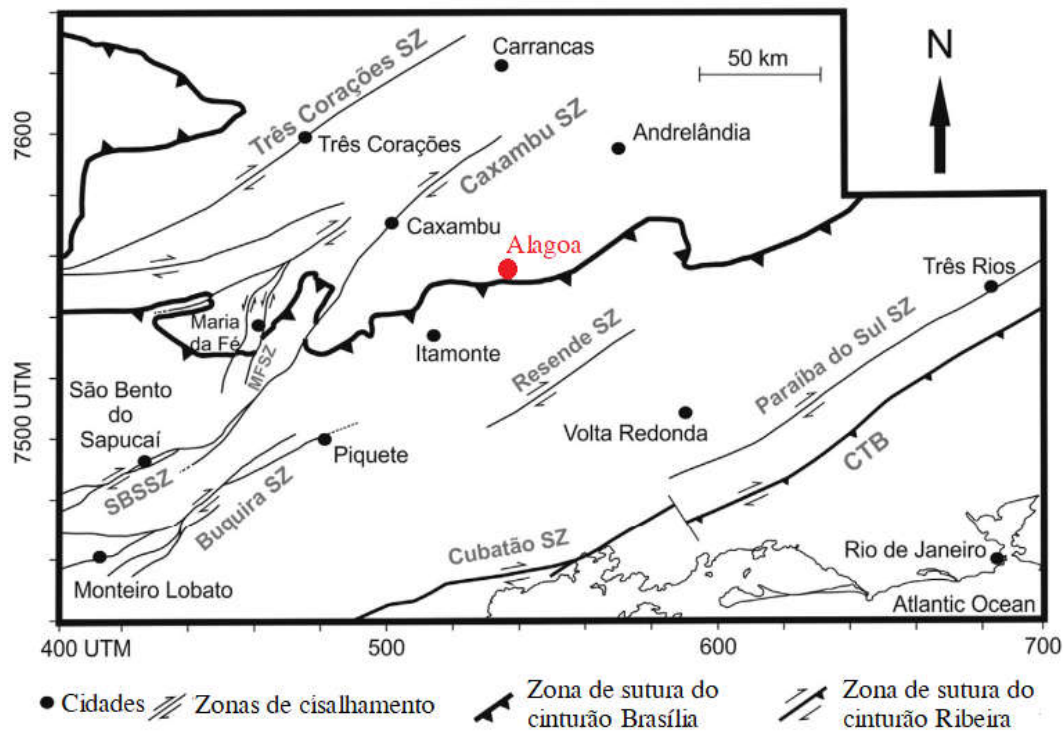
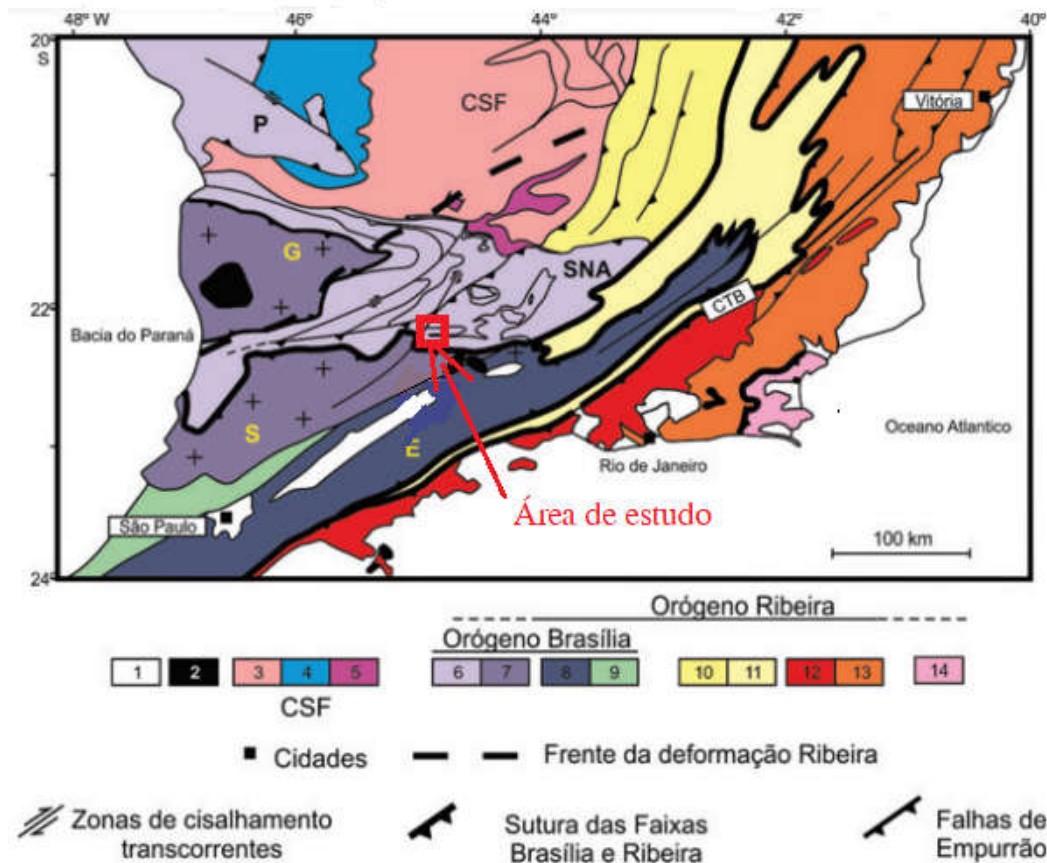


Figura 9 - Ilustração das principais estruturas geológicas

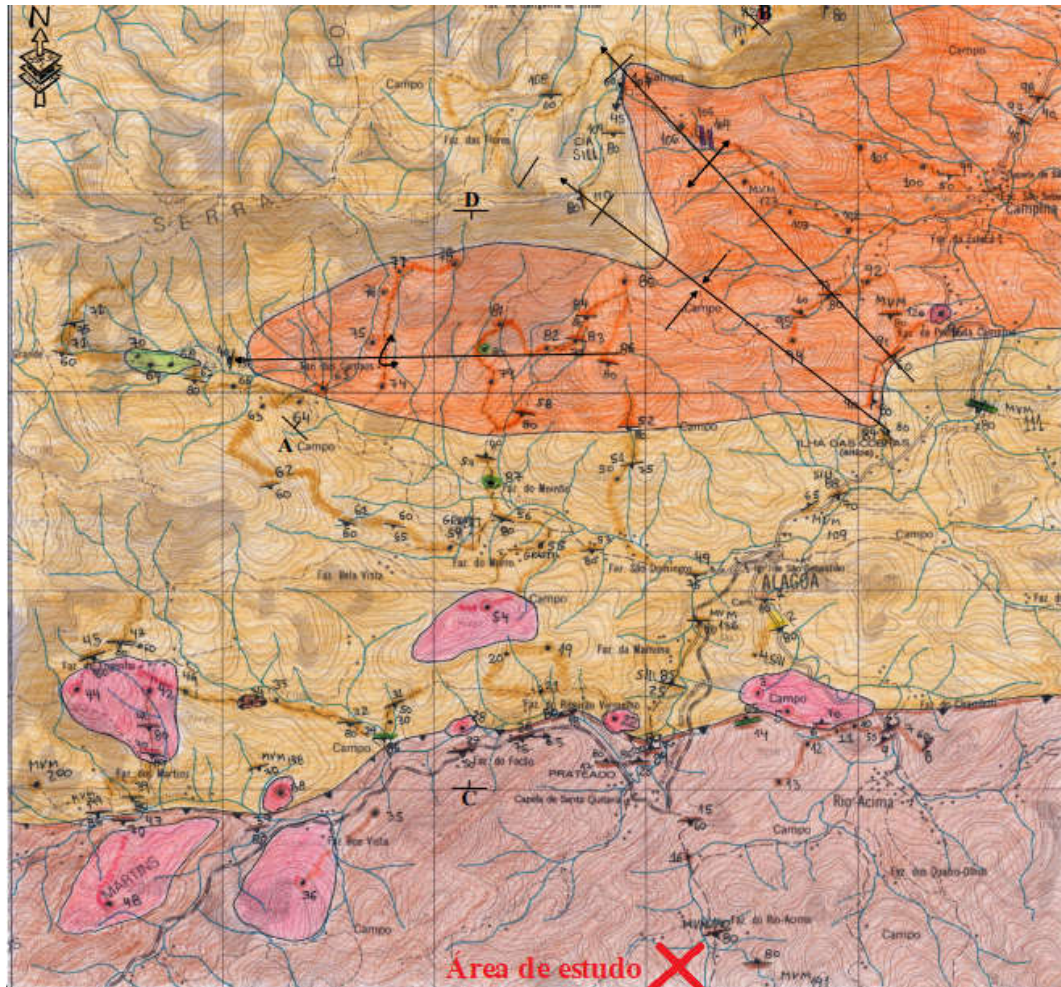
Fonte: TROUW. et al. (2013), modificado.



Legenda: 1- Bacias sedimentares fanerozóicas; 2- Rochas alcalinas Cretáceas/Terciárias. 3- Embasamento do Cráton São Francisco; 4- Cobertura sedimentar do Cráton São Francisco; 5- Metassedimentos de domínios autóctones. Orógeno Brasília: 6- Nappes inferiores; 7- Nappe Socorre-Guaxupé. 8- Embú - Terrenos Paraíba do Sul; 9- Terreno Apiaí. Orógeno Ribeira: 10- Domínio externo e 11- Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental. Terreno Oriental: 12- Arco Rio Negro; 13- Sucessões metassedimentares Neoproterozóicas; 14- Terreno Cabo Frio. O retângulo vermelho é a localização da área de mapeamento

Figura 10 - Mapa tectônico da transição entre a Faixa Brasília meridional e o segmento central da Faixa Ribeira

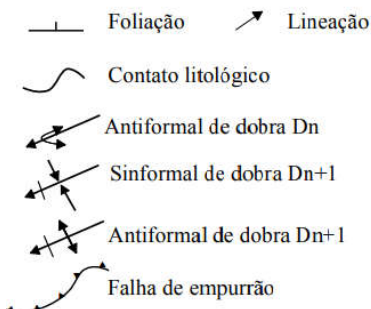
Fonte: TROUW. et al. (2013), modificado.



Legenda

CIA- ocorrência de cianita
SILL- ocorrência de sillimanita
GRAFIT- ocorrência de grafite

Estruturas



Unidades de mapeamento

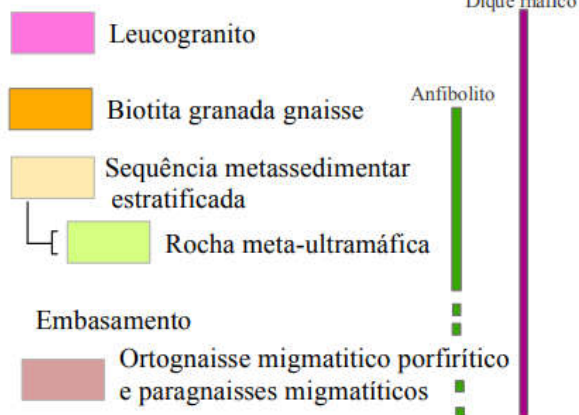


Figura 11 - Mapa geológico da área de Alagoa, sul do Estado de Minas Gerais, local onde foi realizado o estudo de caso

Fonte: PAULA (2012), modificado.

Os migmatitos do embasamento, de acordo com Paula (2012), são ortognaisses migmatíticos grosseiros, em sua maioria porfiríticos, localmente bandados, e paragnaisse migmatítico com rocha calcissilicática intercalada.

O ortognaisse migmatítico, segundo Paula (2012), possui as seguintes características: quando fresco, mostram coloração cinza e, quando alterados, apresentam uma coloração marrom avermelhada e apresentam estrutura claramente gnaissica, possui granulação grossa e migmatítica do tipo estromática bandada, com fenocristais de feldspato de até dois centímetros de comprimento.

Na Figura 12 é possível observar o ortognaisse migmatílico com coloração fresca e alterada. Observa-se também dobras relativas às deformações ocorridas no maciço, além da estrutura estromática.



Figura 12 – Ortognaisse migmatítico I
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 13, observa-se o ortogneisse migmatítico bandado com estruturas estromáticas e oftálmicas. As bandas mais escuras são formadas por minerais máficos e chamadas de melanossoma, já as partes mais claras são ricas em minerais félsicos e chamadas de leucossoma.



Figura 13 – Ortogneisse migmatítico II
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As rochas paraderivadas, quando frescas, são ricas em minerais máficos, apresentando coloração cinza clara a cinza escura e, quando alteradas, apresentam uma coloração bege amarronzada, portam de estrutura gnaissica bandada, apresentando bandas centimétricas de níveis mais máficos compostos de biotita, granada e feldspato e níveis mais feldspáticos, indicando uma sutil diferença de textura (PAULA, 2012).

Na Figura 14 é possível observar uma rocha com estrutura gnaissica bandada, notando-se na parte central um plano de falhas de empurrão, além de zonas de cisalhamento que redobram e rotacionam as estruturas.



Figura 14 – Rocha apresentando estrutura gnáissica bandada

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na região também são encontrados leucogranitos finos e, raramente, médios, com corpos pegmatíticos associados, quando frescos possuem cor branca à acinzentada e, quando alterados, se mostram levemente avermelhados. Possuem textura equigranular, granulação fina e com cristais xenomórficos. Estes podem, localmente na borda de determinadas corpos, apresentarem-se com foliação tectônica (Figura 15), podendo ocorrer como diques cortando todas as unidades (Figura 16). (PAULA, 2012).



Figura 15 - Intrusão de leucogranito acompanhando a foliação tectônica de textura equigranular e granulação fina

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).



Figura 16 - Dique de leucogranito equigranular de granulação fina, cortando as demais unidades

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 17 é possível observar as principais estruturas tectônicas do maciço em questão:

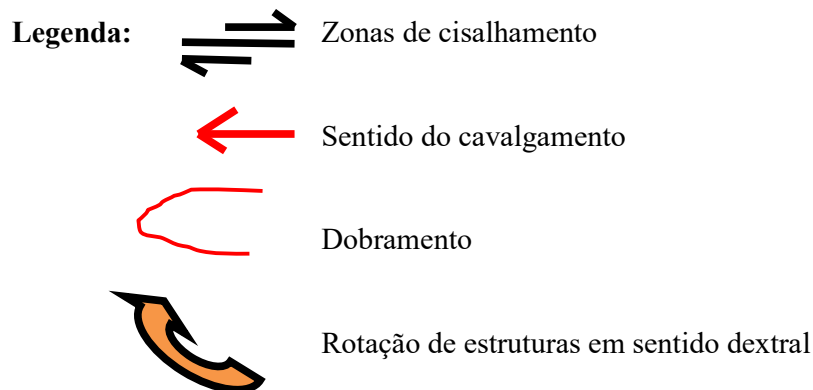
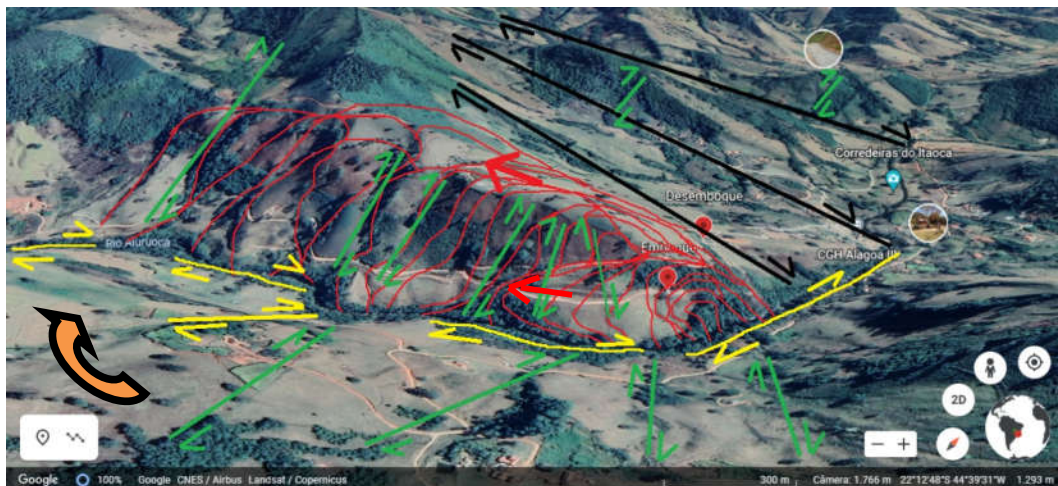


Figura 17 - Principais zonas de cisalhamento existente na área e o sentido do cavalgamento

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Três fases de deformação regional são descritas por Paula (2012), sendo a primeira fase descrita como deformação D_n e que gerou uma falha de empurrão e dobras apertadas e localmente recumbentes. A segunda fase, D_{n+1} , gerou dobras fechadas e localmente abertas, e a terceira, D_{n+2} , gerou dobras suaves e abertas.

3.5.3. Relatório geológico-geotécnico prévio, inicial para realização do trecho de adução em baixa pressão via condutos metálicos em toda sua extensão

Inicialmente, conforme a Welt Energia (2016), o conduto de baixa pressão da CGH Alagoa 2, está posicionado em áreas pedogenizadas, compostas, essencialmente, por neossolos litólicos e latossolos de espessuras fortemente variável, podendo variar de 1 a 8 metros até à interface com a rocha sã. Em geral, a evolução da morfologia do

terreno é de vertentes íngremes com escarpamentos abruptos em vales encaixados, onde a interface entre solo e rocha é relativamente pequena e brusca. Em terrenos com elevada declividade, a espessura das coberturas pedogênicas é rasa; já os terrenos de menores declividades apresentam uma evolução de perfil de alteração maior com formação de solos mais espessos.

Uma descrição importante é contemplada no relatório básico pela Welt Energia (2016), que constata áreas de instabilidade na região de passagem do conduto de baixa pressão, com deslizamentos superficiais e fluxo de massa associados a cunhas de dimensões métricas a dezenas de metros quadrados (Figura 18). Estas áreas de instabilidade estão associadas a elevadas declividades, com solo relativamente raso e ausência de cobertura vegetal nativa.



Figura 18 - Áreas de instabilidade e fluxos gravitacionais
Fonte: WELT ENERGIA(2016).

Por fim, é constatado no relatório básico da Welt Energia (2016), preocupações inerentes à complexidade da locação do conduto de adução em baixa pressão, desde dificuldades relacionadas à alta declividade do terreno, heterogeneidade e instabilidade, por muitas vezes associada a uma forte ação antrópica na região.

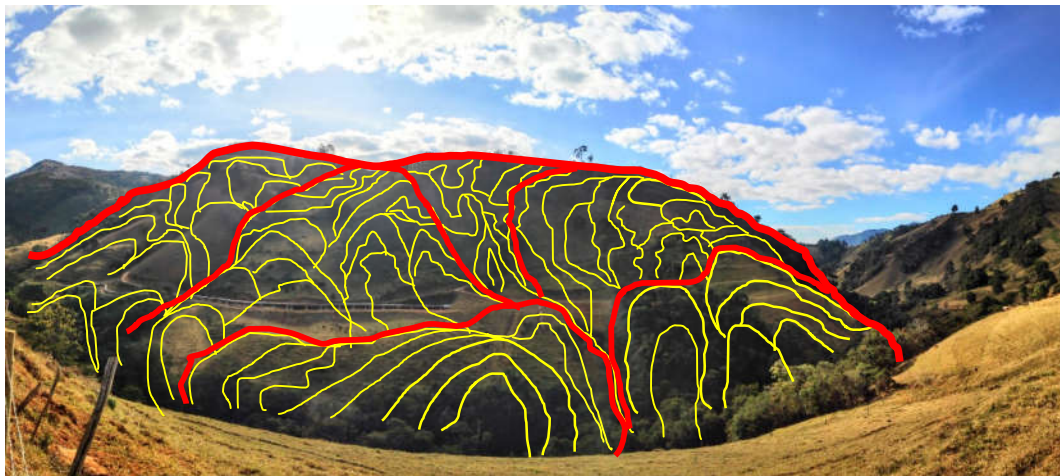
3.5.4 Relatório geológico-geotécnico para elaboração do trecho de adução em baixa pressão por túnel

Para a realização do projeto do túnel, ocorreu, a princípio, a execução de três furos de sondagem, somadas ao levantamento geofísico de eletrorresistividade, ou método do caminhamento elétrico, além de visitas de campo. Estes estudos nortearam a execução da compartimentação geomecânica, apresentada no projeto executivo do túnel de adução em baixa pressão da CGH Alagoa 2. Em consideração às sondagens realizadas, verificou-se a necessidade de uma melhor avaliação geotécnica, devido às informações não condizentes dos boletins recebidos.

Deste modo, um trabalho inicial de mapeamento geológico-geotécnico também fora realizado previamente à construção do túnel.

Neste levantamento de campo (Figuras 19 e 20) foi constatado que o maciço na região do trecho de adução encontra-se bem deformado, com dobras diversas, denotando uma fase de compressão não coaxial, que ocasiona, de acordo com a intensidade do cisalhamento, a rotação de estruturas e formação de dobras apertadas a recumbentes.

Na Figura 19, pode-se observar, em vermelho, dobras maiores chamadas de anticlinais; e, em amarelo, dobras menores dentro do grande anticlinal, ocasionadas por compressão não coaxial, gerando zonas de cisalhamento que rotacionam as estruturas anteriores e, assim, redobrando-as. Esse fenômeno tectônico é típico de Nappes.

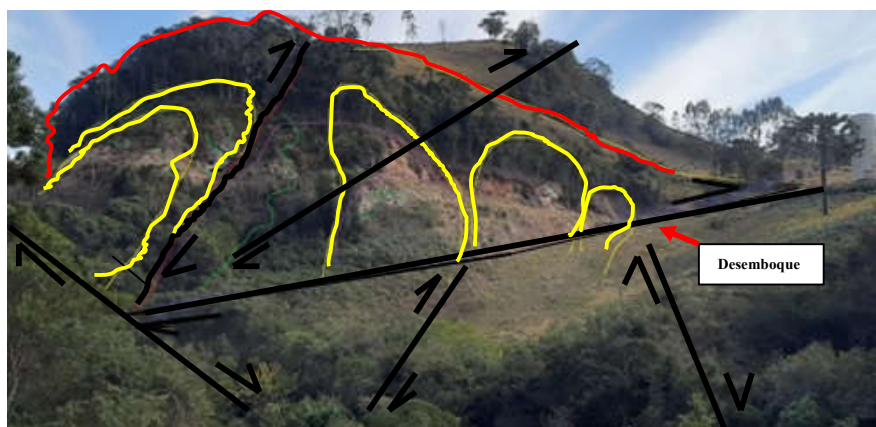


Legenda: — Dobras originadas devido ao esforço compressivo de cavalgamento e retrabalhadas por zonas de cisalhamento
 — Dobra Anticlinal

Figura 19 -Dobras do maciço rochoso

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 20, a qual ilustra o trecho do penhasco, é possível visualizar, em traços na cor amarela, dobras menores, mais apertadas e rotacionadas por zonas de cisalhamento dextrais, dentro de uma dobra suave maior em vermelho.



Legenda: — Zonas de cisalhamento
 — Dobras originadas devido ao esforço compressivo de cavalgamento e retrabalhadas por zonas de cisalhamento
 — Dobra anticlinal

Figura 20 - Dobras no trecho do penhasco

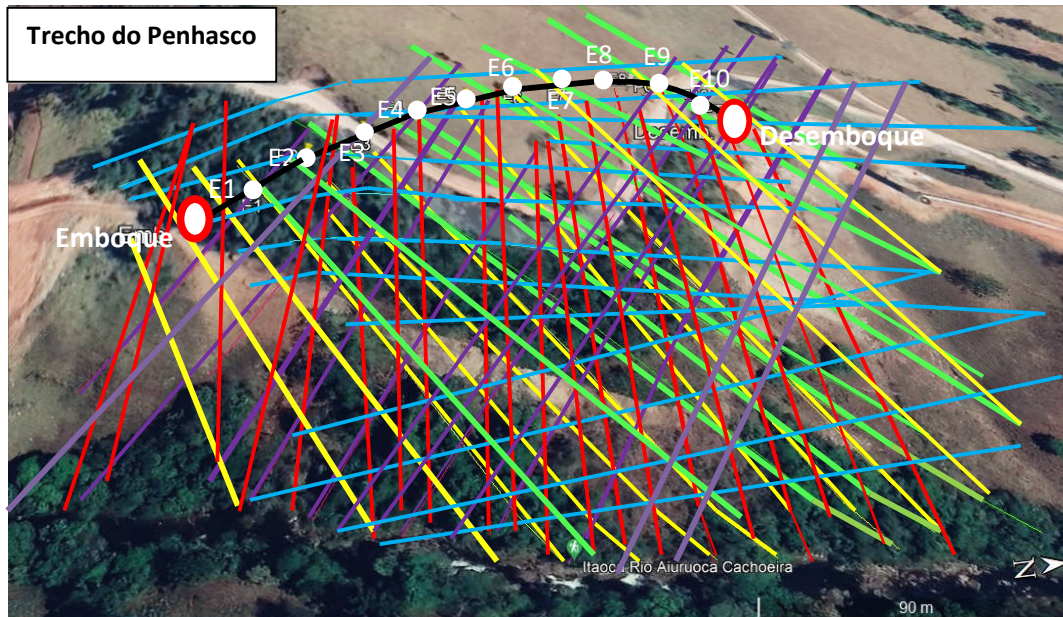
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na localidade do trecho de adução do penhasco, que seria realizado por condutos metálicos no projeto, e como em todo o trecho da execução do conduto por túnel, observa-se as direções preferenciais do fraturamento e suas respectivas famílias com variados ângulos de mergulho e direções apontando a formação de cunhas, principalmente na região de encosta, por onde passaria o conduto metálico (Figuras 21 e 22). Diante da análise do mapeamento realizado no local, constata-se também que poucas fraturas possuem aberturas expressivas, sendo, a maioria delas, fechadas.



Figura 21 - Direções preferenciais do fraturamento do maciço no desemboque do túnel
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na área de estudo, observa-se no maciço rochoso uma predominância de fraturas conjugadas (Figura 22) formadas por uma compressão não coaxial, que gera cisalhamento simples e zonas transcorrentes, transpressivas e de transtração.



- Legenda: Fraturas
- Direção N60 e mergulhos variando de 40° a 60°.
 - Direção N90 e mergulhos sub-verticais
 - Direção N40 e mergulhos variando de 30° a 40°
 - Direção N130 e mergulhos variando de 50° a 60°
 - Direção N90 e mergulhos sub-verticais
 - Traçado do túnel
 - E1 Estacas de 20m em 20m, no sentido do fluxo hidráulico
 - Emboque e Desemboque.

Figura 22 - Direções preferenciais do fraturamento no trecho do penhasco, onde foi executado o túnel de adução

Fonte: GOOGLE EARTH (2022), modificado.

À medida que o avanço do mapeamento geológico-geotécnico ocorre, elementos estruturais são mapeados, tais como indicadores cinemáticos, direções preferenciais de fraturamento, falhas, lineações minerais, dobras, foliações entre outras estruturas geológicas. A análise sistemática destes elementos estruturais é capaz de identificar sentidos de movimentação e vetores de tensão pretéritos do maciço rochoso, identificando o modo de propagação das fraturas e propiciando uma maior compreensão de como novas tensões poderão se comportar frente ao maciço rochoso.

Segundo Irwin (1960) apud Bortolucci (1993), três são os modos de propagação de uma fratura, em função das tensões aplicadas e dos consequentes deslocamentos observados, estando estes modos e tensões exemplificados na Figura 23.

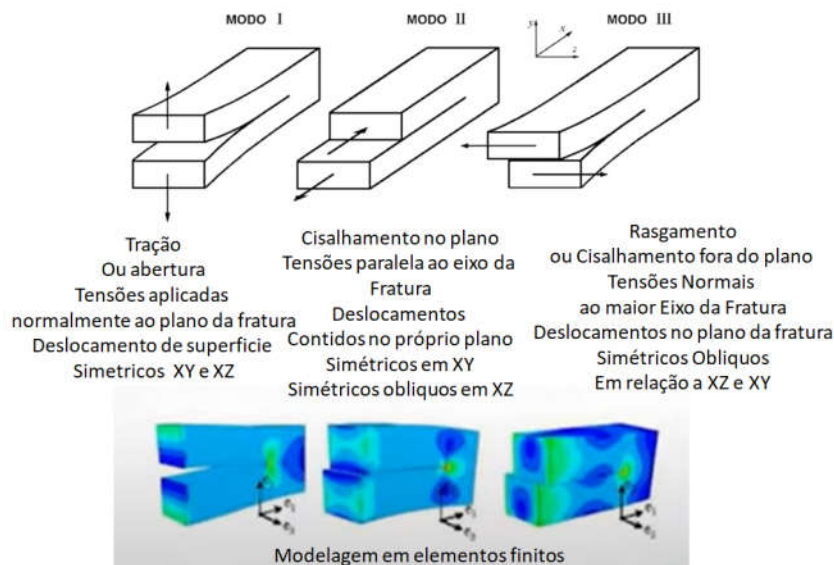


Figura 23 - Modos de propagação de fratura e modelagem das tensões aplicadas
Fonte Bortolucci (1993), modificado.

Conforme CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021), através de mapeamento de campo, relata-se algumas regiões onde o fluxo de água ocorre, seja através da observação de grotas, nascentes e outros apontamentos, assim como a vegetação local. De acordo com a Figura 24, cabe relatar também que o levantamento geofísico por eletrorresistividade possui alto potencial para detectar a presença de água. Assim, nota-se que os valores referentes à eletrorresistividade abaixo de 1.000 ohm.m denotam a presença de água que pode estar associada às zonas de falhas em subsuperfície, pois a percolação de água pela fratura ou falha reduz o valor da resistividade local.

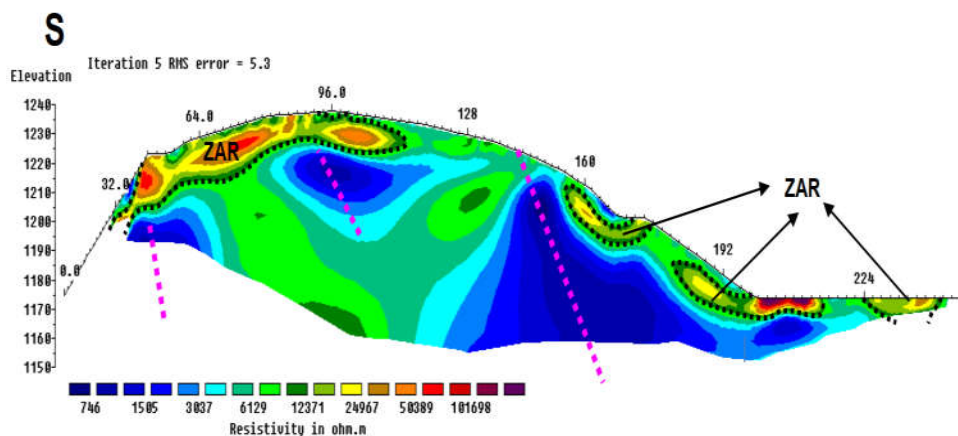


Figura 24 - Seção de resistividade elétrica da área de implantação do túnel
Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Ainda na Figura 24, os tons de azul mais claros representam menos água e os tons de azul mais escuros correspondem às zonas com maior intensidade de água no maciço. Ressalta-se que os valores de resistividade altos em superfície indicam a presença de rochas sãs, denotando solos pouco espessos. No geral, pode-se observar na Figura 24 uma predominância de valores acima de 2.000 ohm.m, que associam-se à possível presença de rocha sã.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição do método

O método utilizado neste trabalho foi o dedutivo. Este método, segundo Prodanov e Freitas (2013), enuncia princípios, leis ou teorias tido como verdadeiros e, a partir daí, prediz os fatos baseados na lógica.

A pesquisa dedutiva baseia-se na razão, utilizando-se um raciocínio lógico, para explicar o conteúdo das premissas. (PRODANOV; FREITAS, 2013)

4.2. Metodologia

A metodologia utilizada para se alcançar os objetivos propostos foi fundamentada em 02 (duas) etapas descritas a seguir.

Na primeira etapa da dissertação apresenta-se o estudo de caso, descrevendo, primeiramente, a localização da área de estudo da implantação da CGH Alagoa 2, assim como a caracterização desta área, utilizando-se da investigação geológico-geotécnica, de mapas, imagens de satélite e dos projetos relativos à implantação prévia do sistema de adução em baixa pressão, por conduto metálico, e, ainda, de modo análogo, interpretar o porquê da execução do túnel de adução no trecho do penhasco. Para isso, se fez necessária a utilização de toda a documentação referente à implantação dos dois sistemas construtivos, que serviu de base contextual para apontamentos e referências relativas a cada método construtivo proposto.

Na etapa 2 realiza-se o estudo dos impactos entre a realização prévia da adução em baixa pressão no trecho do penhasco, por condutos metálicos e a execução por túnel, deste mesmo trecho, do circuito de adução. Para melhor avaliar esta situação, foi utilizado o método de matriz de Leopold, adaptado por Barbosa e Dupas (2006).

Este método utiliza-se de matrizes e, de acordo com Sánchez (2013), estas são compostas de duas listas, dispostas na forma de linhas e colunas. Nas linhas são elencadas as principais atividades ou ações que compõem o empreendimento analisado, e nas colunas são apresentadas os principais componentes ou elementos dos sistema

ambiental, ou ainda dos processos ambientais, objetivando identificar as interações possíveis entre as interações do projeto e os elementos do meio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Método construtivo do conduto de adução da CGH Alagoa 2 por condutos metálicos e implicações no trecho do penhasco

Inicialmente, conforme a Welt Energia (2016), o circuito de adução foi locado na margem esquerda do rio e deveria ser composto pelas seguintes estruturas: tomada d'água, conduto de baixa pressão, que inclui trecho em duto enterrado e aéreo, chaminé de equilíbrio, conduto forçado, casa de força e canal de fuga.

O circuito de adução em baixa pressão tem extensão de 2.160 metros e uma diferença altimétrica de 4,95 metros entre sua geratriz superior, cuja cota é de 1.181,95m situada na tomada d'água e a chaminé de equilíbrio de cota 1.177,00m seguindo neste percurso com declividade média de 0,23%.

O conduto forçado de baixa pressão foi fabricado na cidade de Alagoa/MG e levado para a obra via caminhões. Cada peça possui 6m de comprimento e diâmetro de 1,90m.

Conforme a construção da CGH foi avançando, foi verificada a necessidade de alterar o projeto inicial e continuar o conduto de baixa pressão através de um túnel. A abertura do túnel se mostrou necessária em virtude da revisão do traçado original (Figura 25), que previa execução do conduto à meia encosta, com a necessidade de detonações de rocha. Nessa opção, ocasionaria o lançamento de materiais e a degradação da Área de Preservação Permanente (APP) imediatamente abaixo do trecho e o eventual deslizamento de rochas para o curso d'água.



Figura 25 - Traçado do conduto de baixa pressão previsto no início da implantação da CGH Alagoa 2

Fonte: WELT ENERGIA(2016).

Dessa forma, o traçado foi revisado para a construção de um túnel para a passagem do conduto de baixa pressão, conforme Figura 26.



Figura26 - Traçado do conduto de baixa pressão após o túnel (projeto executado)

Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

É notável que na linha de passagem do conduto por meio do penhasco deve haver a supressão de vegetação e mobilização de terra, conforme ilustrado na Figura 27, com cortes e aterros para a adequação do terreno que irá passar o conduto, ou mesmo a criação de valas para enterrar este.



Figura 27 - Supressão de vegetação e mobilização de terra para passagem do conduto no trecho do penhasco e suas proximidades
 Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Deste modo cabe dizer que, com o avanço da obra segundo a concepção inicial, utilizando condutos metálicos em todo o sistema de adução, ocorreu uma supressão desnecessária de 0,20 hectares, a qual poderia ter sido evitada. A intensa mobilização de terra para a execução dos condutos pode ocasionar, devido à falta de vegetação e em períodos chuvosos, o carreamento de sedimentos encosta abaixo, podendo estes chegar ao rio conforme elucidado na Figura 28.



Figura 28 - Carreamento de sedimentos após período chuvoso nas proximidades do trecho do penhasco
 Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Na Figura 29 é possível visualizar, numa vista aérea, toda a supressão realizada para passagem do conduto no trecho do penhasco.



Figura 29 - Vista aérea do conduto de baixa pressão

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

De fato, em julho de 2020, durante as detonações para a implantação do conduto de baixa pressão, uma pedra, de tamanho considerável, deslizou para o leito do rio Aiuroca, conforme as Figuras 30, 31 e 32.



Figura 30 - Pedra que deslizou para próximo do leito do rio Aiuroca

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).



Figura 31 -Blocos e sedimentos que rolaram após detonações e reentrâncias criadas no maciço

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).



Figura 32 -Vista aérea da escavação em rocha no trecho do penhasco, nota-se a grande quantidade de matéria em suspensão.

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Esse incidente chamou a atenção de Organizações Não Governamentais (ONGs) e do Ministério Público de Minas Gerais para a construção da CGH Alagoa 2, sendo

solicitada uma medida cautelar no processo nº 5000956-73.2020.8.13.0330, a qual transitou no Tribunal de Justiça de Minas Gerais, na comarca de Itamonte, Minas Gerais.

Em 17 de agosto de 2020, no mencionado processo, foi concedida uma medida liminar que determinou a suspensão das obras pelo prazo de 120 dias. A mencionada decisão foi suspensa em 03 de setembro de 2020, após ser agravada, sendo as obras retomadas.

Foi ajuizada a ação principal no Tribunal de Justiça de Minas Gerais, na comarca de Itamonte, Minas Gerais, sob o nº 5001153-28.2020.8.13.0330, alegando que os impactos ambientais, sociais e econômicos não foram devidamente observados no momento do licenciamento ambiental. Posteriormente, foi declinada a competência para conhecer o processo e a ação foi ajuizada no Tribunal Regional Federal da Primeira Região, Comarca de Pouso Alegre, Minas Gerais, sob o número 1000476-37.2021.4.01.3810, ainda em curso.

As detonações prévias a céu aberto realizadas para a transposição do penhasco por condutos metálicos foram executadas de forma não muito coerente com as propriedades geológico-geotécnicas da região em questão.

Primeiramente, por ter-se utilizado de furos horizontais, devido ao tipo de perfuratriz que não consegue acessar o maciço de outra forma, sendo que o correto para a situação seria a utilização de furos verticais. Entretanto, mesmo sob a técnica mais apurada de detonação, fatalmente ocorreria o lançamento de detritos, bem como o deslizamento de um ou outro bloco devido à intensa deformação do maciço em questão e ainda por seus planos de ruptura de alto ângulo de mergulho (Figuras 33 e 34).



Figura 33 - Perfurações sendo realizadas horizontalmente

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

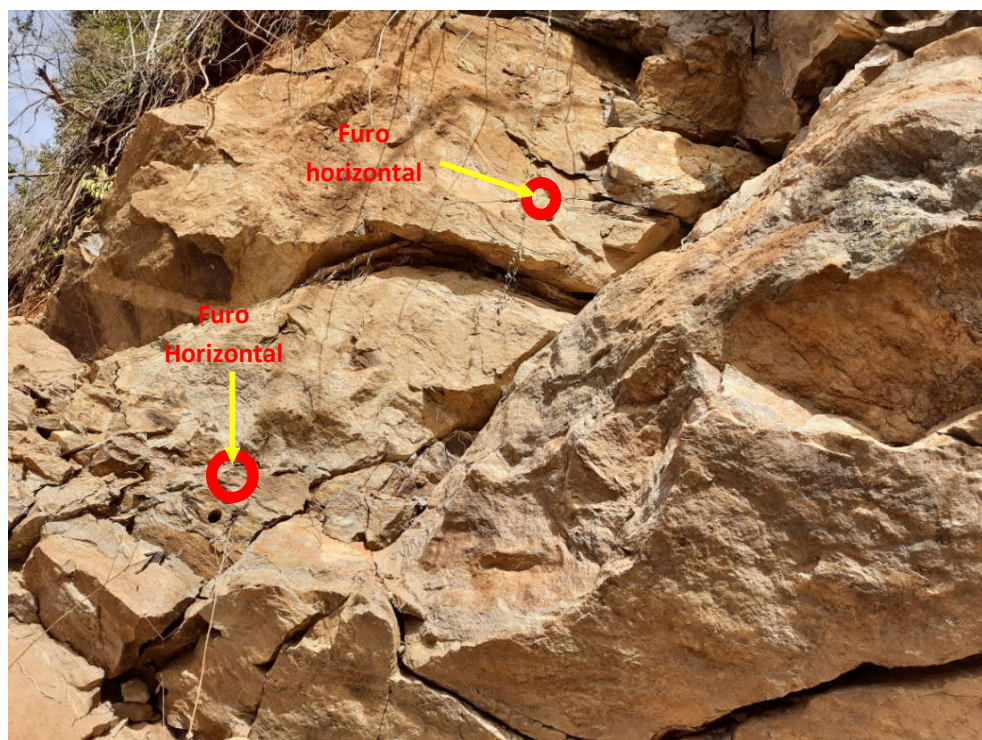


Figura 34 - Perfurações sendo realizadas horizontalmente e sem uma malha adequada

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

5.2. Método construtivo do túnel de adução em baixa pressão no trecho do penhasco da CGH Alagoa 2 e suas implicações

O túnel de adução da CGH Alagoa 2 foi executado segundo o método New Austrian Tunneling Method (NATM). Este método surgiu em meados da década de 1960, através do professor Rabcewicz, em frente aos avanços do concreto projetado. Consiste em escavar, em avanços sequenciais, previamente estabelecidos e parcializados, de acordo com a geometria da seção, utilizando do concreto projetado como suporte de sustentação adjunto com outros elementos estruturais, tais como cambotas metálicas, telas de aço ou tirantes. Em cada avanço, aproveita-se a capacidade de auto-sustentação do maciço para realizar a execução das estruturas de suporte. Caso se verifique que a estrutura não possui resistência portante, se faz tratamentos anteriores à escavação para incremento da segurança, de acordo com esta sucessão de eventos este método é conhecido como método das deformações controladas (LIMA, 2012).

Nos túneis em rochas competentes de maior resistência, se faz a escavação utilizando técnicas a fogo, através do dimensionamento de explosivos estrategicamente dimensionados e posicionados, mediante um plano de fogo realizado por profissional habilitado e inseridos no maciço rochoso por meio de máquinas perfuratrizes.

A Figura 35 apresenta o plano de fogo elaborado para a detonação do maciço rochoso na área de implantação do túnel, estabelecendo a razão de carga, total de explosivos e volume desmontado no corte.

PLANO DE FOGO								
		CLIENTE	Alagoa 2 Energia Ltda					
		OBRA	Túnel Alagoa 2					
		REF:	Desemboque					
Número do Fogo: 01	Local	0+3,40	Data	07/09/2021	Hora	11:00	Rocha	Gnaise granítico
Diam. do Furo (mm)	51,00	Tampão(m)	0,60	Arranque(%)	95%	densid.(g/cm³)	2,65	
Número de Furos auxiliares	15,00	Dist. Estrura Concreto(m)	25,00	Número de Furos levante(sapateria)			5,00	
Número de Furos Contorno	22,00	Veloc. part.(mm/s) Langefors	3,45	Furo médio (m)			2,20	
Número de Furos pilão	12,00	Vol emulsão(dcm³)	1,24	Espaçamento furos auxiliares (m)			0,90	
Explosivo-Emulsão bombeado Ø (in)	2,00	Comprimento bombeado(in)	24,00	Afastamento (m) furos auxiliares			1,00	
N.º de cartucho/furo auxiliar	0,40	Peso do cartucho(kg)	1,36	Espaçamento (m) furos de pilão			0,37	
N.º de cartucho furo de pilão	0,53	N. de espoletas não elet.	34,00	Afastamento (m) furos de pilão			0,37	
N.º de cartucho furo sapateria	0,53	N.º total de cartuchos	14,95	Espaçamento (m) furos sapateira			0,50	
Densidade do explosivo(Kg/dcm³)	1,10	Área(m²)	14,80	Afastamento (m) furos sapateira			0,50	
N. de espoletas c/ mesmo tempo F. auxiliar	3,00	Vol. util do furo(dcm³)	3,27	Inclinação do furo			15%	
N. de espoletas c/ mesmo tempo F. Pilão	2,00	Cordel NP 5(m)	6	Razão de carga (kg/m³)			1,58	
N. de espoletas c/ mesmo tempo F. sapat.	3,00	Cordel NP 60(m)	59	Total de explosivos(kg)			48,85	
Carga máxima por espera(kg)		2,16	Espaçamento churrasc.	0,4	Volume desmontado no corte(m³)		30,93	
Cordel (kg/m) NP	60,00	0,06	n. cartucho cont. sapateira	1,58	Adensamento sapateira		20%	
Booster iniciador		400,00			Adensamento furos auxiliares		15%	
K- cor. da área		14	K - veloc. De partícula	400,00	Adensamento Pilão		20%	
CONSUMO DE EXPLOSIVOS								
ITEM			TIPO	QTD.	RASTREABILIDADE			
Quantidade de explosivo			KG	48,85				

Figura 35 - Plano de fogo I

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021)

Por sua vez, a Figura 36 apresenta o plano de fogo da mesma área a partir de um croqui da geometria das furações, tipos de explosivos, tempos relativos de acionamento e raio de isolamento.

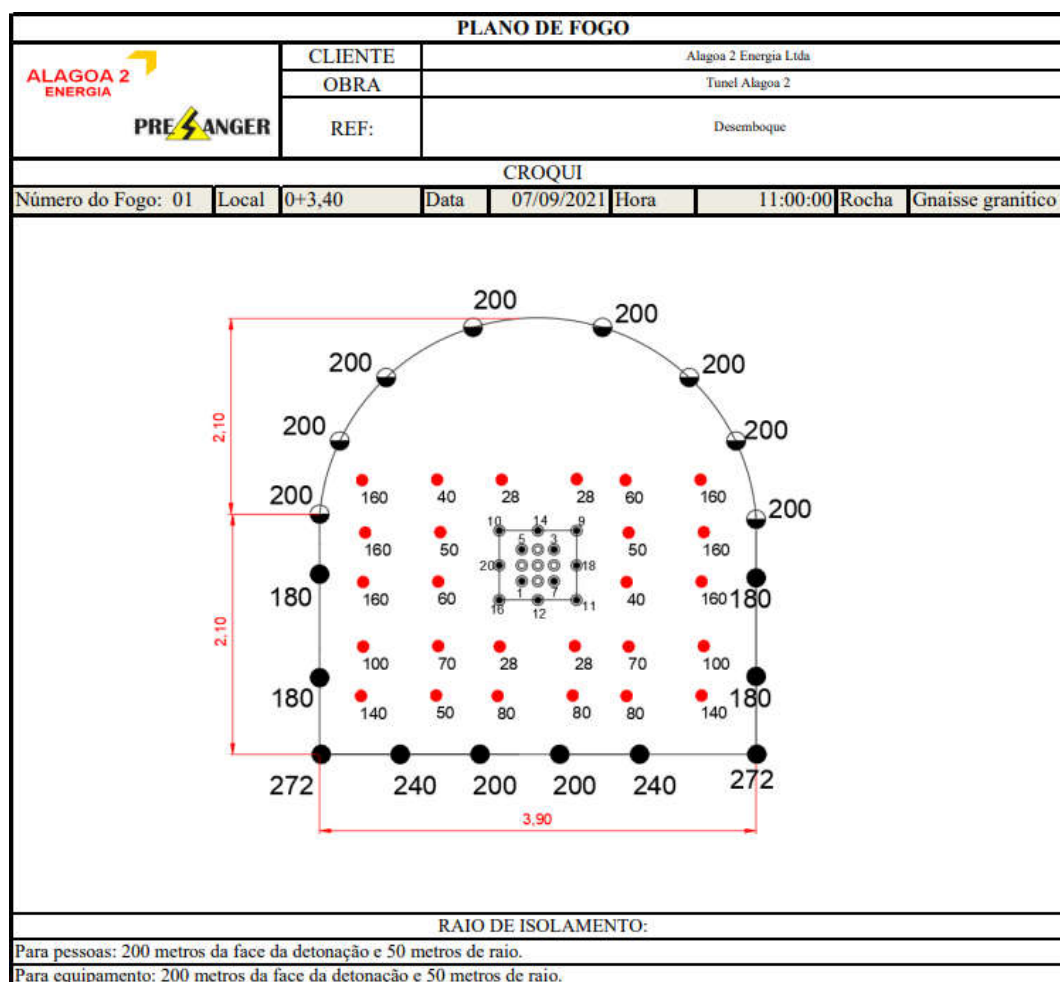


Figura 36 - Plano de fogo II

Fonte:CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021)

O método NATM é um método observacional, onde a deformação e a estabilidade do maciço e estruturas de suporte são monitoradas constantemente, através de instrumentação que melhor orientam as condições pertinentes a deformações e relaxamento do maciço, sendo um instrumento extremamente importante para devidos alertas, ou mesmo readequações de suporte para um próximo avanço, e validação do modelo geológico (LIMA, 2012)

Segundo Sauer (2004) apud Lima (2012), o método NATM destaca-se por diversas ferramentas que são disponíveis em projeto, construção e tratamento do maciço,

possibilitando a escavação por este método em uma grande variabilidade de materiais, desde solos a rochas.

Na construção de um túnel pelo método NATM, segundo Ribeiro Neto (2000) apud Lima (2012), ocorre um grande número de operações e atividades a serem realizadas de forma sequencial, dentro de um ciclo estabelecido pelas equipes de escavação, que estão suscetíveis ao fato de um erro humano, sendo esta uma vulnerabilidade do método NATM.

Ressalta-se que, uma obra subterrânea deve ser projetada, desde que se possa controlar e manter aceitáveis os níveis de impacto ambiental a curto, médio e longo prazo, pois as restrições ambientais tendem a impor sérias restrições aos métodos construtivos que não sejam planejados e controlados (RIBEIRO NETO, 2000 apud LIMA, 2012).

Diante das técnicas que envolvem o método NATM, e segundo as condições geológicas do local, verificadas após a realização de sondagens de reconhecimento, levantamento de campo e levantamento geofísico, através da técnica do caminhamento elétrico, o projeto do túnel da CGH Alagoa 2 foi realizado.

De acordo com Müller (1978) apud Vallejos (2021), dos 22 princípios do método NATM, sete são de extrema importância:

- 1- Mobilização das tensões de resistência do maciço – O método depende do maciço remanescente como o componente principal da sustentação do túnel. O maciço remanescente forma um arco colaborante de sustentação por um determinado período.
- 2- Proteção com Concreto Projetado – A pequena camada de concreto projetado aplicado imediatamente após a escavação permite um alívio de tensão controlada.
- 3- Medidas – Cada deformação da escavação deve ser medida. O NATM requer a instalação de instrumento de monitoramento instalados na casca circundante da seção.
- 4- Suporte flexível – A camada de concreto projetado primário é fina e reflete as condições primárias do maciço. Suporte ativo e passivo são utilizados em conjunto com o Concreto Projetado (concreto, tirantes, enfilagens) permitindo sempre o alívio de tensão do maciço.
- 5- Fechamento do Invert – O Invert deve ser fechado rapidamente para permitir o fechamento da seção. Este procedimento deve ser seguido de forma rigorosa nos túneis em solo (Maciço classe V).
- 6- Disposições contratuais - Uma vez que o NATM se baseia no controle por instrumentação do maciço, alterações no processo construtivo são possíveis. Isso é possível somente se o sistema contratual permite essas alterações.
- 7- A classificação do maciço para determinar medidas da sustentação - existem várias classificações geológicas para caracterizar os maciços, inicialmente foi utilizado classificação de Lauffer que considera 7 tipos de terrenos, atualmente a classificação de Bieniawski (MRM) e o índice “Q” de Barton são mais detalhadas e que utilizam de mais informações, tem sido

mais utilizado para determinar os tipos de sustentação. (MÜLLER, 1978, apud VALLEJOS, 2021).

Müller (1978) apud Vallejos (2021), enfatizou que o NATM tem sido muitas vezes mal compreendido:

Não é tanto, uma forma de escavar e apoiar, mas sim um conceito. O sucesso depende de seguir um conjunto de princípios, um dos quais é utilizar o maciço rochoso circundante para se tornar o principal componente de suporte de carga, com o revestimento estabelecendo um anel de suporte de carga ". A importância da distância e tempo de fechamento do anel e da seção invertida em solos fracos também são enfatizados em seu estudo.(MÜLLER, 1978, apud VALLEJOS, 2021).

Diante deste método construtivo, como o objetivo principal de mitigar os impactos, é que fora planejado a construção do túnel de adução em baixa pressão da CGH Alagoa 2 no trecho do penhasco, o que se fez viável em decorrência aos aspectos geológico-geotécnicos observados nesta área.

De acordo com a situação, Vallejos (2021) afirma que o projeto do túnel da CGH Alagoa 2, possui como finalidade dar continuidade ao circuito de adução por baixa pressão, através da transposição de trecho rochoso, trecho do penhasco, mediante túnel, tendo como principal premissa a questão ambiental adjunta à segurança.

Destaca-se que os condutos metálicos adentraram por cerca de 24,5 metros na parte montante e 47,5 metros na parte de jusante, sendo que por 144,4 metros o túnel exerce a função de condutor.

Na Figura 37 é possível observar o traçado do túnel e a sua ligação ao circuito de adução de baixa pressão.



Figura 37: Túnel adutor e ligação ao conduto

Fonte: VALLEJOS (2021).

O túnel foi projetado para ser escavado em rocha com classificações geológicas e geomecânicas diferentes ao longo do seu traçado, conforme demonstra a Figura 38, possuindo uma extensão de 216,40 metros e percurso em contraposição à do conduto metálico concebido no projeto inicial (Figura 39) (VALLEJOS, 2021).

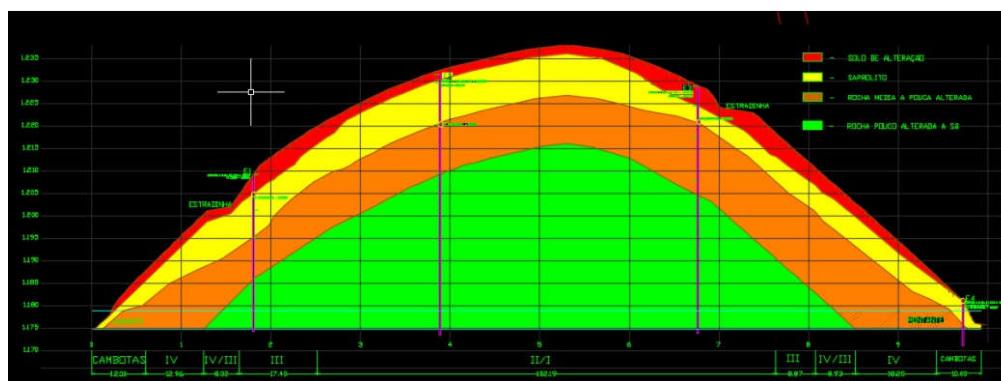


Figura 38 - Perfil geológico do túnel e sua compartimentação geomecânica

Fonte: VALLEJOS (2021).



Figura 39 - Traçado do túnel executado e traçado do conduto metálico conforme projeto inicial no trecho do penhasco
 Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

A geometria adotada para o túnel foi de arco retângulo (Figura 40). Suas dimensões foram firmadas com o propósito de facilitar a contratação de executores e mobilização dos equipamentos utilizados, sendo esta superior à necessidade do conduto adutor, tendo como finalidade encontrar vantagens econômicas ao não utilizar equipamentos especiais (VALLEJOS, 2021).

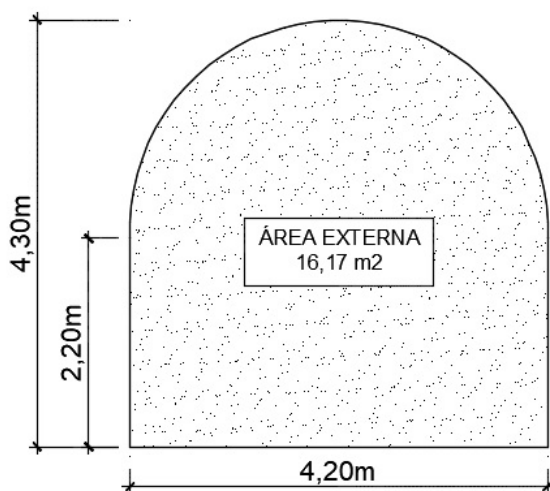


Figura 40: Geometria adotada para a escavação do túnel
 Fonte: VALLEJOS (2021).

Na escavação do túnel somente ocorreu supressão de vegetação nas áreas do emboque e desemboque para a instalação de instrumentação de monitoramento de convergência e para

os devidos tratamentos destas áreas. Já na área de execução dos condutos metálicos, conforme se observa na Figura 41, houve a necessidade de realizar a supressão de vegetação em toda a área do seu traçado. Na Figura 41 é possível notar e comparar a supressão vegetal em ambos trajetos.



Figura 41 - Traçado do túnel executado e traçado do conduto metálico conforme projeto inicial no trecho do penhasco

Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).

Durante todo o processo construtivo do túnel, foram gerados cerca de 3.500m³ de resíduos de rochas oriundos da escavação do maciço rochoso, conforme se observa nas Figuras 42 e 43, sendo estes, em sua grande maioria, cristalinos, não alterados e apresentando ótima resistência à compressão, requerendo muitos golpes de martelo para se fraturar.

Ainda na Figura 42, vislumbram-se resíduos de rocha das detonações perante a escavação do túnel, podendo ser usado, por exemplo, no alteamento de aterros, estabilização de taludes, preenchimento de erosões e poderiam ainda ser britados na obtenção de matéria-prima para a obra. Por sua vez, a Figura 43 apresenta resíduos de rocha oriundos da limpeza do piso do túnel, sendo um material com granulometria mais fina e melhor selecionado, com características favoráveis à aplicação na regularização de acessos.



Figura 42 - Área de empréstimo para transbordo dos resíduos rochosos retirados do túnel

Fonte: CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA (2021).



Figura 43 – Resíduos de rocha originados da limpeza do piso do túnel

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os resíduos de rocha gerados pela construção do túnel foram devidamente destinados. A Figura 44 apresenta uma estrada, na área rural de Alagoa/MG, sendo restaurada com os resíduos de rocha, enquanto na Figura 45 um aterro foi construído para conformar uma erosão

e, por fim, a Figura 46 apresenta a doação de materiais para uma munícipe que irá construir um aterro para nivelar a área onde expandirá a sua residência.



Figura 44 – Restauração de estrada na zona rural do município de Alagoa/MG
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).



Figura 45 – Construção de aterro para conformar erosão
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).



Figura 46 – Doação de resíduos para município

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A fim de avaliar o nível dos impactos ambientais, os autores Demarco, Cantoni e Passini (2017) elaboraram a Tabela 2, de acordo com as características geradas a partir da ocorrência do evento.

Tabela 2 -Escala de impactos ambientais

Escala de cores	Pesos	Combinação de atributos
	12	Regional/ direto-indireto / irreversível / magnitude alta
	11	Regional/ direto-indireto / irreversível / magnitude média
	10	Regional/ direto-indireto / irreversível / magnitude baixa
	9	Local/ direto-indireto / irreversível / magnitude alta
	8	Local/ direto-indireto / irreversível / magnitude média

	7	Local/ direto-indireto / irreversível / magnitude baixa
	6	Regional/ direto-indireto / reversível / magnitude alta
	5	Regional/ direto-indireto / reversível / magnitude média
	4	Regional/ direto-indireto / reversível / magnitude baixa
	3	Local/ direto-indireto / reversível / magnitude alta
	2	Local/ direto-indireto / reversível / magnitude média
	1	Local/ direto-indireto / reversível / magnitude baixa
	0	O impacto descrito não ocorre em nenhum momento da implantação
	-1	Impacto positivo

Fonte: DEMARCO; CANTONI; PASSINI (2017).

A Tabela 3 apresenta os principais impactos ambientais, econômicos e sociais apontados pelo autor na obra CGH Alagoa 2 em relação à construção do conduto de adução em baixa pressão, tanto no trecho do penhasco quanto na execução do túnel.

Tabela 3 - Principais impactos gerados na área de estudo

1	Instalação/acirramento de processos erosivos e de movimentos de massa associados à construção
2	Mobilização de terra corte/aterro
3	Supressão de solos
4	Detonação de rochas e danos periféricos de instabilidade do maciço
5	Poluição do ar através da Emissão de material particulado no ar.via detonações, transporte de máquinas e mobilização de maquinários.
6	Impacto do ar ou “airblast”, que é a propagação de energia sob a forma de

	pressão acústica.
7	Emissão de gases CO ₂ e N ₂ relativo às detonações.
8	Queima de combustíveis pelas máquinas utilizadas no processo construtivo.
9	Supressão de vegetação
10	Alteração da flora natural, como também da fauna
11	Abalos ocasionados pelas detonações e consequente desconforto
12	Ruídos oriundos das máquinas
13	Lançamento de materiais durante as detonações
14	Impacto visual ocasionado pelas detonações para a implantação da construção.
15	Quantidade de água utilizada no processo construtivo.
16	Alteração da qualidade da água com a construção.
17	Vazamentos de óleos e demais graxas de máquinas no decorrer do processo construtivo
18	Geração de resíduos
19	Insegurança e ansiedade da população local
20	Criação de novos empregos para a população local
21	Movimentação da economia local
22	Imprevistos quanto ao método construtivo
23	Atrasos e embargos judiciais originados pelo método construtivo
24	Distância total do trecho projetado
25	Custos de implantação do sistema construtivo
26	Mudanças de projeto no decorrer da construção
27	Condições geológicas-geotécnicas desfavoráveis
28	Ausência de investigações e estudos geológicos-geotécnicos

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para melhor interpretar os resultados e diferenças qualitativas entre a implantação do conduto de baixa pressão no trecho do penhasco e via túnel, é possível visualizar na Tabela 4 a associação entre a escala de impactos ambientais (Tabela 2) e os principais impactos ambientais observados conforme a Tabela 3.

Tabela 4 – Matriz de comparação entre os impactos ambientais causados pelo conduto de baixa pressão no trecho do penhasco e via túnel

Número do impacto listado (Tabela 3)	Adução em condutos metálicos			Adução em túnel		
	Nível de impacto ambiental (%)	Peso de impacto ambiental (Tabela 2)	Nota	Peso de impacto ambiental (Tabela 2)	Nota	Nível de impacto Ambiental (%)
1	4,84	3	A	1	MB	3,70
2	3,23	2	A	1	MB	3,70
3	3,23	2	Med	1	MB	3,70
4	4,84	3	MA	1	MB	3,70
5	3,23	2	Med	2	B	7,41
6	3,23	2	A	1	B	3,70
7	1,61	1	B	1	B	3,70
8	1,61	1	A	1	A	3,70
9	4,84	3	A	1	MB	3,70
10	4,84	3	A	1	MB	3,70
11	4,84	3	MA	1	Med	3,70
12	1,61	1	B	2	A	7,41
13	4,84	3	MA	1	MB	3,70
14	4,84	3	MA	0	MB	-
15	-	0	Med	1	MA	3,70
16	1,61	1	B	1	B	3,70
17	1,61	1	Med	1	Med	3,70
18	1,61	1	Med	-1	MA	-
19	9,68	6	MA	0	MB	-
20	-	-1	A	-1	B	-
21	-	-1	A	-1	A	-
22	9,68	6	MA	2	Med	7,41
23	9,68	6	MA	0	-	-

24	3,23	2	Med	1	B	3,70
25	1,61	1	B	3	A	11,11
26	4,84	3	A	1	B	3,70
27	4,84	3	A	1	B	3,70
28	4,84	3	MA	2	Med	7,41
Total de unidade de impacto ambiental	60			23		

Legenda: MA = Muito Alto; A= Alto; Med = Média; B=baixa; MB = Muito Baixa

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como pode-se observar através da matriz de comparação (Tabela 4), os fatores de magnitude físicas, como processo erosivos e principalmente detonações de rochas, ocasionaram impacto ambiental negativo. Outrossim, as grandes vibrações e lançamento de materiais encosta abaixo, e aliado a estas ao impacto visual das feições pós detonação, ocasionaram um cenário de insegurança da população que, conseqüentemente, contestou a implantação da CGH Alagoa 2, culminando com ações e embargos de ordem judicial, baseadas no questionamento de supostos impactos negativos gerados pela construção no local da área de estudo.

Sendo assim, este impasse judicial fora resolvido com a mudança do método construtivo e implantação do túnel, gerando um imprevisto de projeto de alto custo. Assim, a construção do túnel, a princípio, gerou um grande impacto negativo em relação aos custos de implantação da CGH Alagoa 2, porém este foi de vital importância para a diminuição dos impactos negativos ocasionados pela obra na área de estudo, especificamente no trecho do penhasco.

Ademais, o túnel demonstrou-se potencialmente capaz de não só diminuir os impactos locais como também regionais, e que melhor poderiam ser aproveitados se o túnel fosse concebido desde a etapa de projetos básicos da obra, eliminando riscos e os agravantes de ordem judicial e, além disso, a própria obra poderia se beneficiar dos resíduos de rocha e dos princípios da economia circular, bem como com a diminuição de transportes de insumos, como a brita.

Cabe ainda salientar que os estudos geológicos-geotécnicos iniciais não foram realizados de forma condizente, sendo falhos, ou até mesmo precários, nas investigações e em dados e informações para tomada de decisões seguras. Como resultado dos estudos deficientes, a obra da CGH Alagoa 2 gerou imprevistos e elevou os impactos ambientais, sociais e econômicos negativos.

Por fim, as Figuras 47 e 48 apresentam o resultado final da construção do túnel, demonstrando as áreas que causam maior impacto ambiental negativo, seja pela supressão vegetal ou mesmo visual.



Figura 47 – Conduto externo acessando o túnel através do emboque de montante
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

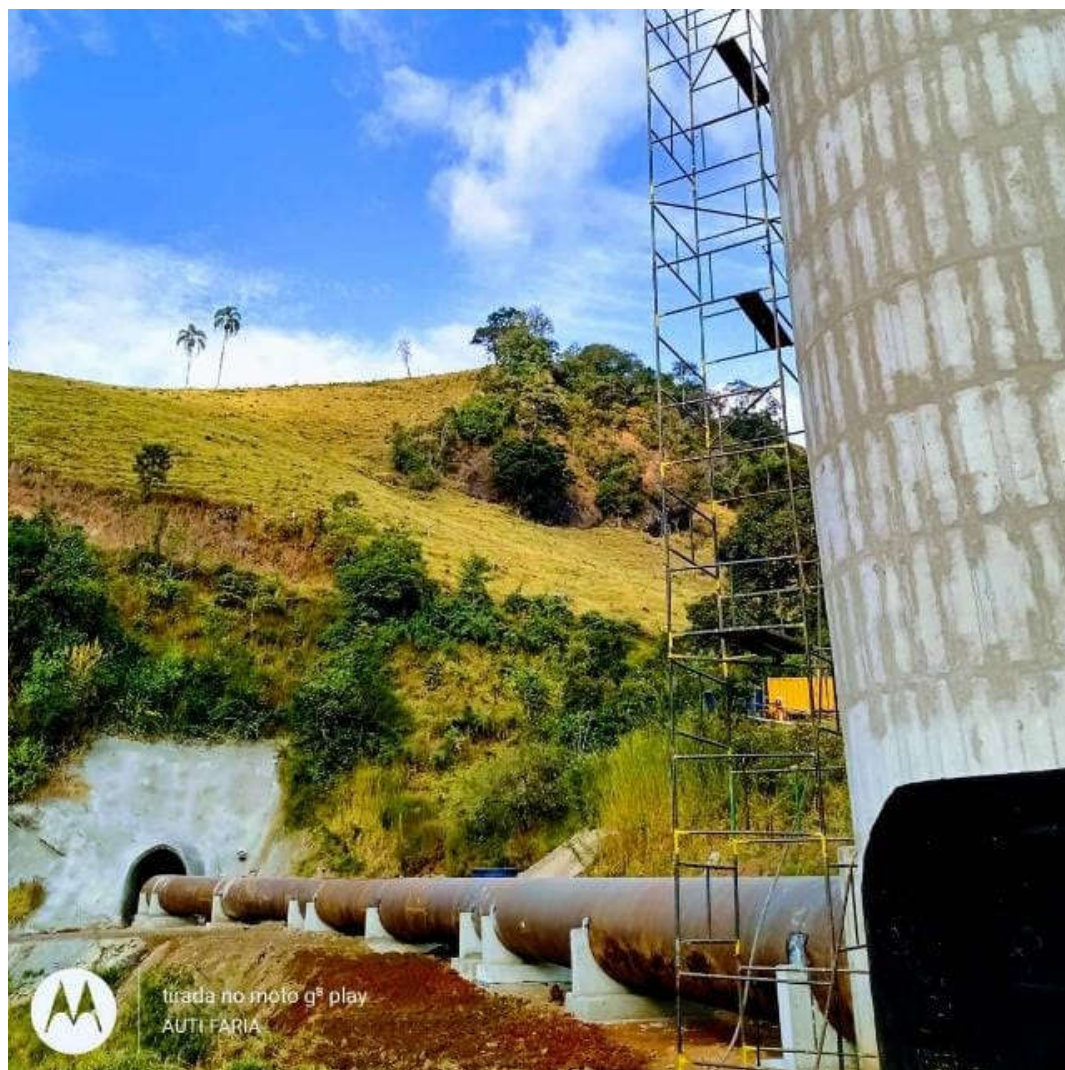


Figura 48 – Desemboque de jusante e término do circuito de adução em baixa pressão ligando o conduto à chaminé de equilíbrio
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6. CONCLUSÃO

As CGHs se apresentam como uma alternativa sustentável para a produção de energia elétrica, através de uma fonte renovável, qual seja, a energia hidrelétrica. Isso porque, apresentam baixo impacto ambiental, social e econômico, além de possuir um bom custo-benefício e atrair investidores do setor privado, especialmente considerando os fomentos governamentais.

Ademais, a construção de túneis nas obras de CGHs podem diminuir ainda mais os danos ambientais, de acordo com as condições geológico geotécnicas, assim como ocorreu na CGH Alagoa 2, após a execução do túnel de adução.

Cabe ressaltar que, se desde o início do projeto fosse planejado um túnel de adução para a construção da CGH Alagoa 2, em oposição aos condutos de adução de baixa pressão livres à meia encosta (aéreos), os impactos ambientais, sociais e econômicos seriam ainda menores e, além disso, a empresa executora teria maior proveito econômico, podendo-se utilizar dos resíduos de rocha em toda a etapa construtiva do empreendimento.

Por fim, vale ressaltar que, conforme exposto no trabalho, os resíduos de rocha do túnel foram cedidos e utilizados em todo o município de Alagoa, tanto por parte da prefeitura do município, como pelos munícipes em diversas situações, como o preenchimento de erosões, a contenção de taludes, melhorias de estradas, estabilização de erosões hídricas, drenos e enroncamentos, entre outras aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação**. 2022. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/306a6fdb-beb9-4296-bf18-77fa0e076ef1/resource/e61fd029-5e78-43be-bed4-873b7b11f04c/download/empreendimento-operacao-historico.csv>>. Acesso em: 05/09/2022.

ALVES, J. E. D. **Demografia e economia nos 200 anos da independência do Brasil e cenários para o século XXI**. Rio de Janeiro: ENS, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCHS) E CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS (CGHS) – ABRAPCH. **O que são PCHs e CGHs**. 2014. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/2014/03/o-que-sao-pchs-e-cghs/>>. Acesso em: 20/07/2022.

BALSUBRAMANIAN, A. **Tunnels – types and importance**. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314174382_Tunnels-types_and_importance/citation/download>. Acesso em: 23/07/2022.

BARBOSA, T. A. S.; DUPAS, F. A. Matriz simplificada para avaliar impactos ambientais em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). **Revista Brasileira de Energia**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 1-9, 2006. Disponível em: <<https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/195/178>>. Acesso em 24/11/2022.

BORTOLUCCI, A. A. **Modelo de ruptura em compressão de materiais frágeis baseado na mecânica da fratura e aplicado ao efeito-escala**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

BRASIL. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 - ano base 2020**. Ministério de Minas e Energia – MME/ Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Brasília, 2021.

BRASIL. **Balanço energético nacional: relatório síntese 2022 – ano base 2021**. Ministério de Minas e Energia – MME/ Empresa de Pesquisa Energética - EPE. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_SC3%Adntese_2022_PT.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 9.074**, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19074cons.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 9.427**, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9427cons.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 9.478**, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19478.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 10.848**, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Lei nº 13.360**, de 17 de novembro de 2016. Altera a Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, a Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013, a Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989, a Lei nº 9.491, de 9 de setembro de 1997, a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a Lei nº 11.488, de 15 de junho de 2007, a Lei nº 12.767, de 27 de dezembro de 2012, a Lei nº 13.334, de 13 de setembro de 2016, a Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015, a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, e a Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015; e dá outras providências. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm>. Acesso em: 02/11/2022.

BRASIL. **Lei nº 14.182**, de 12 de julho de 2021. Dispõe sobre a desestatização da empresa Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras); altera as Leis nos 5.899, de 5 de julho de 1973, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, 10.848, de 15 de março de 2004, 13.182, de 3 de novembro de 2015, 13.203, de 8 de dezembro de 2015, 14.118, de 13 de janeiro de 2021, 9.648, de 27 de maio de 1998, e 9.074, de 7 de julho de 1995; e revoga dispositivos da Lei nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/Lei/L14182.htm>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **MME publica o impacto potencial da redução dos tributos nas faturas dos consumidores de energia elétrica**. Ministério de Minas e Energia – MME, 12 de julho de 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-o-impacto-potencial-da-reducao-dos-tributos-nas-faturas-dos-consumidores-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 18/07/2022.

BRASIL. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

BRASIL. **Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica: 2006-2015**. Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2006.

CELESTINO, T. B.; KOSHIMA, A.; TELLES, R. C. D. **Túneis do Brasil**. São Paulo: DBA, 2006.

CGH ALAGOA 2 ENERGIA LTDA. **Relatório anual consolidado: julho/2020 à maio/2021**. Alagoa/MG, 2021.

CONAMA. **Resolução nº 001**, de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acesso em: 20/11/2022.

CORRÊA, M. L. Contribuição para uma história da regulamentação do setor de energia elétrica no Brasil: o Código de Águas de 1934 e o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Política & Sociedade**, [s.l.], v. 4, n.6, p. 255-291, 2005.

DEMARCO, J. O.; CANTONI, F.; PASSINI, A. F. C. Estudo de impacto ambiental em uma pequena central hidrelétrica. **Revista DAE**, [s.l.], v. 66, n. 209, 2018.

ELETROBRAS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. S.d. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>. Acesso em: 20/07/2022.

FERNANDES, G. S. **Centrais geradoras hidrelétricas: uma análise procedimental de sua aprovação e viabilidade**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2019.

GETTINGER, B.; EGGER, D.; GOODFELLOW, R. **Tunnel systems: the Green solution for 21st century water systems**. ICSDC, 2011.

GOOGLE. Google Earth website. <http://earth.google.com/>, 2022.

GUIDICINI, G.; MELLO, F. M.; CARVALHO, N. S. **Patologia de túneis hidráulicos: acidentes e incidentes no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

HUYMAJER, M.; WOEGERBAUER, M.; WINKLER, L.; MAZAK-HUEMER, A.; BIEDERMANN, H. An interdisciplinary systematic review on sustainability in tunneling-bibliometrics, challenges, and solutions. **Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 1-33, 2022.

IBGE. **Mapa Interativo**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/#/mapa/?share=WyJuby1sYXllciIsNyxbLTQ5MDE2MDEuODIwNTAzMDA5NSwtMjA4MTc5OS4xODEzOTM1Njg5XSxbWyJuYXQiLDE1Nix0cnVILDEsMF1dXQ==>>. Acesso em: 23/11/2022.

LIMA, J. J. **Evolução das obras subterrâneas: planejamento, uso, soluções construtivas e novas tecnologias**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Construções Civil: Excelência Construtiva e Anomalias). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2012.

LORENZO, H.C. **Eletrificação, urbanização e crescimento industrial no estado de São Paulo, 1880-1940**. 1993. Tese (Doutorado em Geografia - Concentração em Organização do Espaço) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1993.

LORENZO, H. C. O setor elétrico brasileiro: passado e futuro. **Perspectivas**, São Paulo, v. 24-25, p. 147-170, 2001-2002.

MAKARON, P. M. **Análise de viabilidade de projetos de pequenas centrais hidrelétricas: pontos críticos de sucesso a partir de estudos de caso no estado de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2012.

MERE, G. S. A. **A importância das investigações geotécnicas em projetos de implantação de centrais geradoras hidrelétricas**. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica – Fundações e Obras de Terra) - Universidade Cidade de São Paulo, Belo Horizonte, 2017.

MESQUITA, J. B. **Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica**. 2008. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

MESQUITA, O. S. **Proposta de um método para avaliar melhorias tecnológicas em energia com foco na eficiência energética**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica – Telecomunicações e Telemática) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

NILTON, C. L. **O impacto das pequenas centrais hidrelétricas - PCHs no meio ambiente**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação Latu Sensu em Formas Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

NUNES, A. L.; RIOS FILHO, M. G. Manutenção e recuperação de túneis no Brasil. **Geotecnia**, n. 152, p. 43-85, 2021.

OLIVEIRA, N. C. C. **A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil**. **Varia História**, Belo Horizonte, v. 34, n. 65, p. 315-346, 2018.

PAULA, R. R. **Geologia da área de Alagoa, sul do estado de Minas Gerais**. Monografia (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PEREIRA, R. B. **O Setor Elétrico Brasileiro no período de 1930 a 1964 e o Desenvolvimentismo**. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SOARES, K. J.; FREITAS, G. A.; MENEZES, B. F.; ROCHA, M. H. F. F.; MOREIRA, G. A.; NAVES, A. C. T. S. G.; RODRIGUES, L. G. M.; PASSOS, M. A.; OLIVEIRA, D.;

MARQUES, R. F. P. V.; SOARES, D. J.; FERREIRA, I. T. R. Marcos históricos do setor hidrelétrico brasileiro. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 7, 2022.

SOUSA, W. L. **Impacto ambiental de hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens**. 2000. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira. **Novos Estudos**, v. 79, p. 47-69, 2007.

TRIBUNAL DE JUSTIÇA DE MINAS GERAIS. Vara Única da Comarca de Itamonte. Ação Civil Pública nº 5000956-73.2020.8.13.0330. Distribuído em: 05/08/2020.

TRIBUNAL DE JUSTIÇA DE MINAS GERAIS. Vara Única da Comarca de Itamonte. Ação Civil Pública nº 5001153-28.2020.8.13.0330. Distribuído em: 18/09/2020.

TRIBUNAL REGIONAL FEDERAL DA PRIMEIRA REGIÃO. Primeira Vara Federal Cível e Criminal da SSJ de Pouso Alegre-MG 1000476-37.2021.4.01.3810. Distribuído em: 02/02/2021.

TROUW, R. A. J. et al. A new interpretation for the interference zone between the southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 43-57, 2013.

VALLEJOS ENGENHARIA LTDA. **Memorial descritivo para túnel adutor: obras para implantação do conduto forçado para ligação a estação geradora da unidade alagoas 2**. Alagoa/MG, 2021.

VOIT, K.; KUSCHEL, E. Rock material recycling in tunnel engineering. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 8, p. 1-16, 2020.

WELT ENERGIA. **Projeto básico consolidado: CGH Alagoa 2 – Rio Aiuruoca**. [s.l.], 2016.