



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Recuperação das Comportas de Uma Grande Barragem**

**LUÍS MARIA VAZ PATO TRIGO PEREIRA**  
Licenciado em Engenharia Mecânica

Relatório de Estágio de Natureza Profissional para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora:

Doutora Maria Alexandra Sousa Rodrigues

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutor Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Doutora Maria Alexandra Sousa Rodrigues

**Novembro de 2023**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

## **Recuperação das Comportas de Uma Grande Barragem**

**LUÍS MARIA VAZ PATO TRIGO PEREIRA**  
Licenciado em Engenharia Mecânica

Relatório de Estágio de Natureza Profissional para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora:

Doutora Maria Alexandra Sousa Rodrigues

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutor Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Doutora Maria Alexandra Sousa Rodrigues

**Novembro de 2023**



## *Agradecimentos*

Agradeço a toda a equipa da Empresa que me recebeu muito bem e ajudou a crescer profissionalmente, em especial ao Eng.º Gomes pelos importantes ensinamentos e conhecimento que me transmitiu ao longo destes meses e ao Eng.º Pereira pela oportunidade que me concedeu assim como todos os ensinamentos que partilha.

Deixo um agradecimento especial à minha orientadora, Doutora Maria Alexandra Rodrigues pelo incentivo e pela dedicação durante todo este processo.

Agradeço também a colaboração e disponibilidade prestada neste projeto pelos técnicos e colaboradores das empresas nossas parceiras e do cliente, o que proporcionou um ambiente produtivo e contribuiu para o sucesso da intervenção.

Por último, agradeço à minha família e amigos que me acompanharam, apoiaram e incentivaram durante todo o meu percurso.



## *Resumo*

No âmbito de um projeto de reabilitação dos descarregadores de cheias de uma barragem em arco de dupla curvatura, a Empresa desenvolveu e implementou um sistema de controlo para a avaliação da segurança da operação de comportas.

Este sistema permitiu quantificar os esforços que se desenvolvem sobre as comportas, durante o seu movimento, esforços estes devidos às deformações no paredão da barragem e interferência com a própria comporta.

Os elevados esforços registados com o sistema põem em risco o próprio funcionamento futuro das comportas. Situação não aceitável devido ao carácter crítico do funcionamento destes órgãos de segurança.

Consciente da situação, o dono da barragem decidiu pedir à Empresa para conceber e implementar um processo de recuperação da comporta/peças fixas.

O presente relatório refere-se ao acompanhamento da atividade de recuperação com foco particular nos aspetos relacionados com o comportamento da comporta durante o processo de recuperação.

Palavras-chave:

Barragem, Comporta, Reabilitação de comportas, Maquinagem



## *Abstract*

As part of a project to rehabilitate the flood spillways of a double-curvature arch dam, the Company developed and implemented a system for monitoring mechanical forces to assess the safety of the floodgate operation.

This system allowed to quantify the stresses that develop on the floodgates throughout their movement due to the deformations in the dam wall and its interference with the floodgate itself.

The high levels registered with the system put the future functioning of the floodgate at risk. This situation was deemed unacceptable due to the critical nature of the functioning of these dam security elements.

Aware of the situation, the owner of the dam decided to ask The Company to design and implement a recovery process for the floodgate/fixed parts.

This report refers to the recovery activity with a particular focus on aspects related to the behavior of the floodgate during the recovery process.

Keywords:

Dam, Watergate, Sluice, Rehabilitation of sluice gates, Milling



## *Índice Geral*

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	2
1.3	Organização do documento .....	3
2	Barragens, comportas e alguns problemas associados.....	5
2.1	Barragens.....	5
2.1.1	A Barragem em estudo .....	6
2.2	Comportas .....	6
2.3	Problemas associados às barragens e às comportas .....	9
3	O projeto.....	11
3.1	O procedimento de reparação e riscos associados.....	14
3.2	A intervenção .....	16
3.2.1	A equipa de trabalho.....	17
3.3	O processo de intervenção.....	18
4	Intervenção .....	21
4.1	Trabalhos Preparatórios – Controlo Dimensional.....	21
4.1.1	Sistema de Controlo .....	22
4.1.2	Levantamentos topográficos.....	27
4.1.3	Controlo de folgas com palpa folgas .....	28
4.2	Maquinagem.....	31
4.2.1	Máquinas de Fresar.....	31
4.2.2	Aços a maquinar .....	33
4.2.3	Ensaios de dureza .....	34
4.2.4	Controlo de maquinagem .....	36
4.2.5	Alinhamento das fresas.....	37

4.2.6	Estratégia de maquinagem.....	38
4.3	Reinstalação das forras em aço inoxidável.....	40
4.4	Melhorias nas Máquinas de Fresar .....	44
5	Outros trabalhos realizados .....	47
5.1	Controlo e recuperação das estanquidades .....	47
5.1.1	Inspeção .....	47
5.1.2	Processo de Recuperação.....	48
5.2	Inspeção e reparação das peças fixas .....	52
5.2.1	Reparação de fissura na blindagem DC1 ME.....	52
5.2.2	Reparação de soldaduras .....	55
5.3	Parafusos e furos com roscas degradadas.....	56
6	Resultados e Conclusões .....	59
7	Referências.....	61

## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Barragem com dois descarregadores abertos .....	1
Figura 2 – Comportas de fundo: A – gaveta; B – lagarta; C – vagão (Cezar & Erbisti, 2002)	7
Figura 3 – Comportas de fundo para diferentes condições – gamas de utilização (Cezar & Erbisti, 2002) .....	8
Figura 4 – Extrato de desenho do fabricante das comportas - Empresa Sorefame - Descarga de meio-fundo equipada com comporta ensecadeira (A) e comporta de serviço (B) (SOREFAME, 1972) .....	9
Figura 5 – Maciços graníticos .....	10
Figura 6 – Comporta dos descarregadores. A – Fotografia do descarregador aberto; B – Desenho alçado lateral.....	11
Figura 7 – Comporta de serviço. A – Modelação 3D (SOLIDWORKS); B – Posição dos 4 roletes .....	12
Figura 8 – Rolete e estanquidade lateral; A – Desenho técnico; B – Rolete montado equipado com extensómetro.....	13
Figura 9 – Sulco causado pela chapa de face da comporta .....	13
Figura 10 – Depressão causada pelos roletes .....	14
Figura 11 – Gráfico de Gantt Excerto do planeamento de obra .....	17
Figura 12 – Suspensão na grua do conjunto da estanquidade lateral .....	21
Figura 13 – A – Rolete com instalação reparada e pronto a instalar; B – Extensómetro e equipamentos instalados no braço da comporta (1 – Extensómetros; 2- Ponte de Wheatstone) .....	24
Figura 14 – DC1 SMEM – Ensaio de abertura total. Em abcissas representa-se a variável tempo e em ordenadas as tensões medidas.....	24
Figura 15 – SMEM – gráfico de esforços nos roletes .....	25
Figura 16 – Equipa a realizar levantamentos topográficos.....	27
Figura 17 – Levantamento topográfico das peças fixas no DC4 – a linha cor-de-rosa representa o mesmo que a linha azul, mas com uma redefinição dos eixos de referência. ....	28
Figura 18 – Numeração de parafusos na comporta, na estanquidade e na peça fixa.....	29
Figura 19 – Medição de folgas em milímetros com a comporta fechada – Na esquerda topo da comporta, à direita soleira. Altura da comporta cerca de 9 metros. Marcações no eixo das ordenadas de 10 em 10 cm correspondendo aos parafusos de fixação das estanquidades.	

Marcações nas abcissas de 5 em 5 mm correspondendo às folgas da comporta com as peças fixas. ....	30
Figura 20 – Máquina nº1 instalada no topo da comporta a maquinar as peças fixas superiores. ....	32
Figura 21 – Máquina nº2 – instalada na parte inferior da comporta a maquinar as peças fixas inferiores.....	33
Figura 22 – Medição da dureza A – Blindagem do DC2; B – Blindagem do DC1 .....	34
Figura 23 – Medição de espessuras com o sonatest T-Gage V – marcação de espessura remanescente DC1 MD .....	37
Figura 24 – Medição de espessuras – marcação de espessura remanescente (detalhe).....	38
Figura 25 – Alinhamento da máquina – Base da máquina 1 .....	38
Figura 26 – Tipo de aparas removidas: A – Aço inoxidável; B – Aço carbono.....	40
Figura 27 – A – Instalação de forras; B – Soldadura (1– Caminho da estanquidade, 2 – Caminho do rolete).....	41
Figura 28 – Ensaio por líquidos penetrantes: A – Aplicação de Líquidos Penetrantes; B – Descontinuidade observada; C – Detalhe da descontinuidade B .....	43
Figura 29 – Proteção anticorrosiva: A – decapagem do aço ao carbono; B – primário aplicado na zona circundante do aço inoxidável.....	43
Figura 30 – A – Pintura anticorrosiva do aço ao carbono; B – Aplicação do betão; C – Pintura do betão .....	44
Figura 31 – Máquina de corte 1: A – Proteção da correia; B – Aplicação do suporte anti vibrações.....	45
Figura 32 – Máquina 1: A – redutor partido; B – novo suporte .....	45
Figura 33 – Sobreaquecimento máquina 2: A – Uso de ar comprimido e borrifador de água; B – Instalação de ventilador.....	46
Figura 34 – Barra de aperto: riscos, sulcos e remoção da proteção anticorrosiva.....	47
Figura 35 – Medição da dimensão do bolbo, para comparação com o valor de projeto, observando-se valor inferior ao expectável resultado de deformação permanente da estanquidade da margem esquerda DC01 – 43mm .....	48
Figura 36 – Medição da dimensão do bolbo da estanquidade da margem direita do DC01, observando-se uma deformação permanente do bolbo maior que na estanquidade da margem oposta – 42.5mm .....	48
Figura 37 – A – Decapagem por jato abrasivo; B – Aplicação da proteção anticorrosiva.....	49

Figura 38 – Ensaio de aderência por tração PULL-OFF observando-se os diversos dispositivos de teste colados às superfícies de teste com pintura anticorrosiva .....	49
Figura 39 – Resultados do ensaio de aderência por tração PULL-OFF – valor mínimo de aceitação 4MPa.....	50
Figura 40 – Resultados do ensaio de medição de espessuras .....	51
Figura 41 – Anilhas de plástico tipo DUBO colocadas para evitar o contacto entre metais..	51
Figura 42 – Ovalização dos furos de regulação lateral; A – antes com 27mm; B – depois com 29mm .....	52
Figura 43 – Fissura na peça fixa.....	52
Figura 44 – Fissura DC1 – localização da fissura na zona de passagem de água e no plano de escorregamento da estanquidade .....	53
Figura 45 – Fissura DC1 – detalhe da fissura com cerca de 11cm de comprimento a começar na soldadura da travessa frontal com a peça fixa lateral .....	53
Figura 46 – Reparação da fissura nas peças fixas DC1; 1-preparação; 2- pré-aquecimento; 3- enchimento; 4- arrefecimento com manta térmica .....	54
Figura 47 – Fissura DC1 – Ensaio de Líquidos Penetrantes após reparação da fissura.....	54
Figura 48 – Fissura observada nas peças fixas entre a parte inferior do aço carbono com a parte do aço martensítico.....	55
Figura 49 – Reparação de fissura – soldadura com elétrodos revestidos E309 MOL.....	55
Figura 50 –Inspeção da zona soldada: A – aplicação de líquidos penetrantes; B – Aplicação de revelador .....	56
Figura 51 – A – Parafuso partido; B – Perno roscado soldado.....	56
Figura 52 – Sistema de controlo – Esforços nos roletes ao logo da abertura e fecho da comporta registados em 3 alturas da intervenção: A – no princípio; B – durante; C – no final.....	59

### *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Classificação do Risco.....	16
Tabela 2 – Registo de durezas nos diferentes tipos de aço.....	35
Tabela 3 – Condições de operação de fresagem dos aços .....	39

### *Índice de Abreviaturas*

RAS – Reações Alcalis-Sílica  
DC – Descarregador de Cheias

ME – Margem Esquerda

MD – Margem Direita

## *1 Introdução*

Por motivos de confidencialidade, os nomes da empresa onde foi realizado o trabalho e do cliente foram omitidos neste documento como tal, serão mencionados ao longo do texto como "Empresa" e "Cliente", "Dono da barragem" ou "Barragem".

O presente trabalho foi desenvolvido na Empresa e teve como objetivo a recuperação das comportas da descarga de meio-fundo (Figura 1) e respectivas peças fixas que fazem o guiamento das comportas da barragem em Moçambique.

Estas comportas permitem descarregar água da albufeira em caso de emergência, ou seja, quando há demasiado caudal a afluir à barragem. São assim denominados como órgãos de segurança da barragem e o seu funcionamento é crítico.



**Figura 1** – Barragem com dois descarregadores abertos

### *1.1 Enquadramento*

A intervenção da Empresa na barragem teve início em 2014 com um conjunto de inspeções prévias ao estado das comportas. Em 2018 é assinado o 1º contrato relacionado com a reabilitação da barragem. As inspeções realizadas surgem na sequência de uma intervenção de outra empresa que tinha durado cerca de 8 anos e o dono da barragem pretendia validar o trabalho efetuado.

O trabalho realizado incluiu a instalação de um sistema de controlo em 2 das 8 comportas, de forma a permitir avaliar o seu comportamento ao longo de todo o seu movimento de abertura e fecho, nomeadamente nos seus pontos de rolamento, braços e articulações. Após validação do sistema, seguiu-se a montagem do mesmo nas restantes 6 comportas.

Com o sistema aprovado, foram retiradas conclusões importantes e preocupantes o que levou o cliente a encomendar à Empresa uma intervenção que permitisse resolver alguns dos problemas que foram identificados. Primeiramente apenas numa comporta ao que se seguiu o pedido de intervenção em mais três.

A intervenção de recuperação das comportas da descarga de meio-fundo e respetivas peças fixas começou no final de 2019 e foi interrompida 2 vezes por motivos relacionados com a pandemia. A intervenção prosseguiu nos anos seguintes tendo terminado em 2022.

## *1.2 Objetivos e metodologia*

O objetivo da intervenção realizada foi reduzir os esforços muito elevados, exercidos pela comporta, sobre as peças fixas superiores.

A comporta é uma estrutura com um comportamento no espaço (ver capítulo 3 O projeto), sendo articulada nos munhões. Verificando-se deformações na estrutura de suporte dos munhões (ver capítulo 2.3 Problemas associados às barragens e às comportas) a comporta desloca-se lateralmente. Provocando interferências e esforços nas peças fixas. Analogamente, o próprio movimento das peças fixas, afastando-as e aproximando-as da comporta, provoca esforços sobre a comporta.

Estes esforços atingiam valores muito elevados e tinham de ser corrigidos.

Em termos gerais a metodologia seguida foi:

- Controlar a posição da comporta relativamente às paredes e conduta onde passa a água, ao longo dos movimentos de abertura e fecho.
- Identificar as zonas de esforços mais elevados e maquinar essas zonas nas peças fixas. Ajustar as forras (existentes por debaixo dos roletes) e as estanquidades laterais de modo a reduzir na medida do possível as interferências.
- Tornar a ensaiar a comporta e registar os novos esforços.
- Repetir se necessário até se obter esforços aceitáveis.

A intervenção realizada teve assim como objetivo, adaptar o funcionamento e posição da comporta às condições de deformação e, na medida do possível, corrigir as deformações que se verificavam.

### *1.3 Organização do documento*

No capítulo 2 faz-se uma introdução genérica do que é e para que serve uma barragem, das suas comportas de segurança e dos problemas que lhes estão associados. Nomeadamente os que estão associados às reações químicas de expansão do betão.

No capítulo 3 faz-se a apresentação do projeto. Descrevem-se as comportas, o procedimento de reparação, os principais riscos associados e o processo de intervenção.

No capítulo 4 detalham-se todos os aspetos relacionados com a intervenção e trabalhos realizados como:

- As metodologias de medição e controlo incluindo a descrição do sistema de controlo e os seus resultados.
- O trabalho de maquinaria, a descrição do equipamento utilizado e as estratégias de controlo do trabalho incluindo ensaios não destrutivos. Os problemas que surgiram e as dificuldades encontradas.

No capítulo 5 descrevem-se diversos outros trabalhos realizados em paralelo ao trabalho principal de maquinação, nomeadamente:

- Controlo e recuperação das estanquidades laterais, incluindo as melhorias para facilitar a afinação lateral;
- Reparação das peças fixas embutidas. Tanto as soldaduras que foram maquinadas como a fissura que surgiu junto da travessa frontal;
- Reparação de furos roscados e parafusos partidos

Finalmente são apresentadas algumas conclusões sobre a metodologia e os resultados obtidos.



## 2 *Barragens, comportas e alguns problemas associados*

### 2.1 *Barragens*

Uma barragem, represa ou açude é uma barreira artificial, feita em cursos de água para a retenção água em menores ou maiores quantidades. O corpo de água resultante é um lago artificial, normalmente designado como albufeira da barragem. A sua utilização serve para uma ou mais das seguintes funções (Cezar & Erbisti, 2002):

- o abastecimento de água de zonas residenciais, agrícolas ou industriais;
- produção de energia elétrica;
- regularização de um caudal.

Nas margens do lago ou na própria barragem existem aberturas, tomadas de água, que permitem, de uma forma controlada, a utilização da água:

- para alimentar turbinas para produção de eletricidade;
- para abastecimento de água ou para rega;
- para assegurar caudais ecológicos a jusante;
- para assegurar a passagem de peixes para montante e jusante da barragem.

As tomadas de água servem ainda para assegurar funções associadas à própria barragem:

- descargas de fundo, para permitir o esvaziamento completo da barragem;
- para desvio provisório, durante o processo construtivo da própria barragem;
- descargas de superfície ou meio-fundo, para funções associadas à própria segurança da barragem – descargas controladas em condições de afluência de caudais excessivos.

Estas aberturas são equipadas com equipamentos, comportas ou válvulas que, dependendo das condições de carga (altura da água a montante) e da própria dimensão (altura x largura ou diâmetro) apresentam diferentes configurações (Cezar & Erbisti, 2002).

É importante lembrar que as barragens podem também representar riscos para as pessoas e para o meio ambiente, especialmente se forem mal projetadas, construídas ou se sofrerem algum tipo de dano (Almeida, 1999). Por isso, é importante que sejam devidamente projetadas e construídas para garantir a sua estabilidade e segurança. Além disso, é necessário realizar

manutenção e uma monitorização regular para identificar e atuar sobre qualquer problema que possa surgir.

### *2.1.1 A Barragem em estudo*

A barragem tem uma altura de 170 m e uma potência instalada de 2075 MW distribuídos por 5 geradores que produziram cerca de 15500 GWh no ano 2022 (Cliente, 2022). O volume de água retida é cerca de 55.8 km<sup>3</sup> dando origem ao 4º maior lago artificial de África.

O Cliente emprega cerca de 780 pessoas diretamente e muitas mais de forma indireta através de empresas prestadoras de serviços, como segurança, trabalhos especializados, manutenção de espaços ou trabalhadores temporários (Cliente, 2022).

Tendo uma grande exportação de energia e dando emprego a tanta gente, o impacto social da hidroelétrica é muito grande, principalmente na vila onde está instalada. É por isso necessário manter tudo a funcionar corretamente, desde a produção de energia, às infraestruturas, passando pela segurança estrutural da própria barragem.

Um problema numa barragem pode dar origem a graves problemas materiais e humanos. No limite, numa barragem destas dimensões esses problemas podem ser catastróficos com uma grande quantidade de mortes e desalojados (Almeida, 1999).

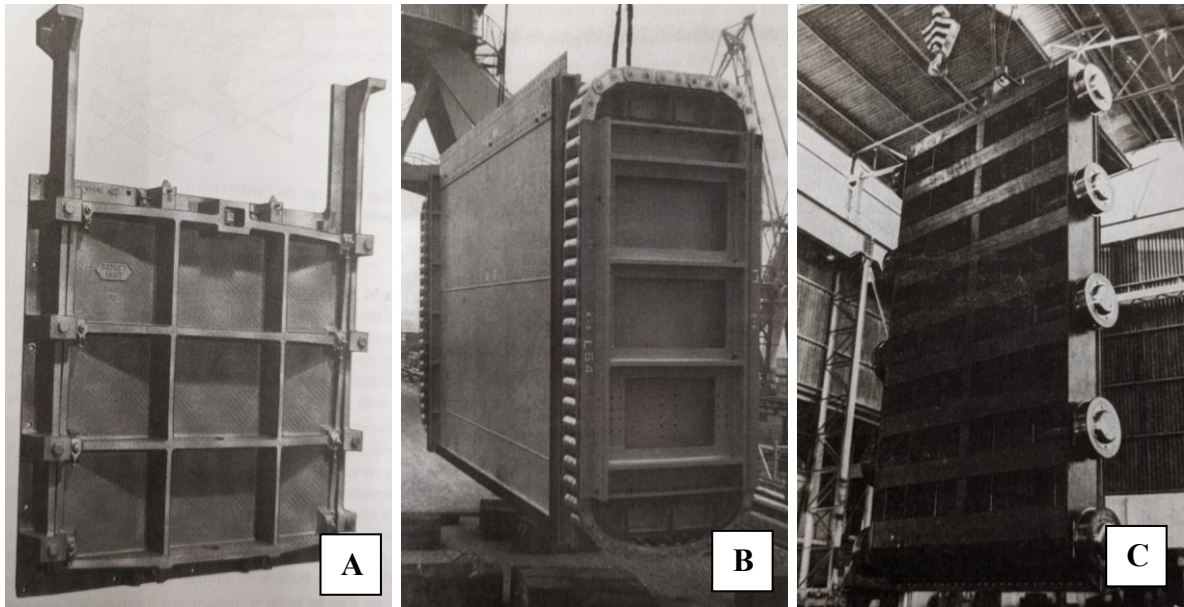
Um dos problemas que pode surgir é haver uma carga de água excessiva na estrutura da barragem. Para evitar este problema existem órgãos de segurança, ou descarregadores de cheias que permitem escoar grandes quantidades de água em relativamente pouco tempo aquando de afluxos extremos de caudal (Cezar & Erbisti, 2002). Neste caso existem oito descarregadores, de grandes dimensões, os quais estão equipados com comportas para controlo do caudal.

## *2.2 Comportas*

Uma comporta é uma barreira móvel que pode ser removida de modo a deixar passar a água retida. Existem muitos tipos de comportas para muitas aplicações diversas como canais, diques, controlo de marés, eclusas e barragens.

Usualmente, os tipos de comportas instaladas em descargas de fundo são as de gaveta, lagarta, vagão (Figura 2) ou segmento (objeto da intervenção deste trabalho) e são selecionadas de

acordo com os requisitos operacionais e com os seus limites de utilização – carga hidrostática e secção necessária das comportas.

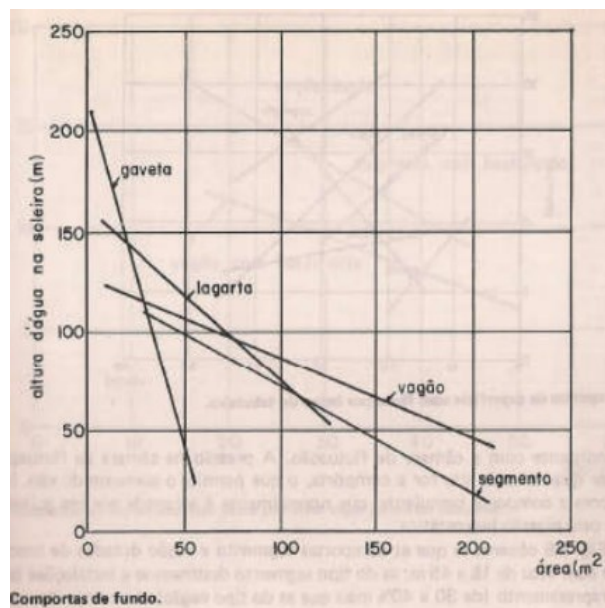


**Figura 2 – Comportas de fundo: A – gaveta; B – lagarta; C – vagão (Cezar & Erbisti, 2002)**

Os requisitos operacionais para uma descarga de fundo são (Cezar & Erbisti, 2002):

- Capacidade de descarga
- Transmissão de esforços ao betão
- Fecho automático em caso de emergência

Os limites de utilização prendem-se com os limites físicos dos materiais, do projeto e cálculo das estruturas, das técnicas e tecnologias de construção e do próprio acionamento das comportas.

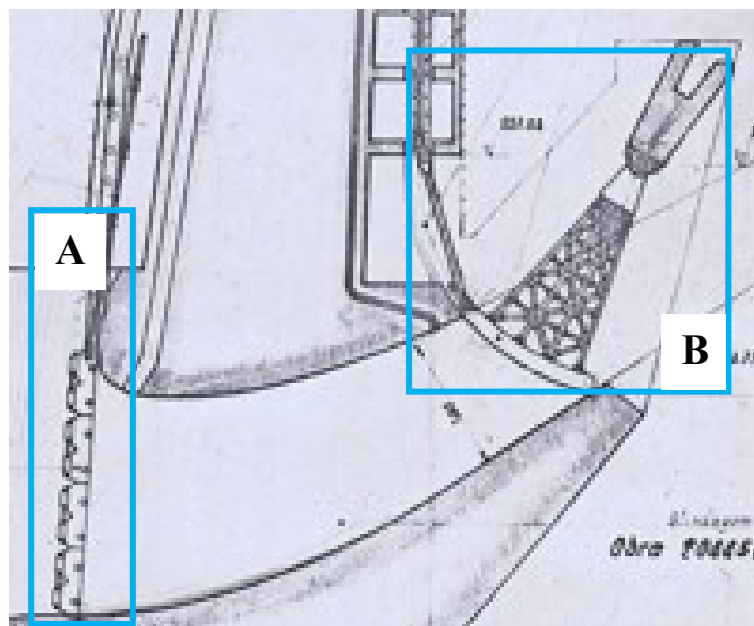


**Figura 3** – Comportas de fundo para diferentes condições – gamas de utilização (Cezar & Erbisti, 2002)

Na barragem, os descarregadores de cheias encontram-se a meia altura do paredão, a cerca de 90 m de profundidade. São denominados por descargas de meio-fundo.

Em cada descarga existem, portanto, duas comportas:

- Comporta de serviço – é uma comporta tipo segmento, articulada num eixo de rotação e o seu movimento é feito por um atuador hidráulico. A comporta está instalada a jusante da própria barragem e é utilizada para a operação normal de descarga de água, funcionando em carga (Figura 4 – B)
- Comporta de ensecagem e de guarda – é uma comporta amovível composta por quatro elementos e um conjunto de barras de suspensão. Pode ser instalada com o pórtico no coroamento em qualquer um dos oito descarregadores de cheias. Esta comporta é utilizada para efetuar a ensecagem do túnel a jusante e da comporta de serviço permitindo assim a realização de manutenções a ambos. Em caso de emergência, serve também para assegurar o fecho e cortar o caudal (numa situação de avaria da comporta de serviço na posição aberta ou em posição intermédia) (Figura 4 – A).



**Figura 4** – Extrato de desenho do fabricante das comportas - Empresa Sorefame - Descarga de meio-fundo equipada com comporta ensecadeira (A) e comporta de serviço (B) (SOREFAME, 1972)

### 2.3 *Problemas associados às barragens e às comportas*

Os excessivos esforços nas comportas resultam do facto das barragens poderem sofrer deformações. Essas deformações advêm de duas causas - do enchimento da barragem, o que provoca uma deformação inicial e das reações químicas no seio do betão.

O betão, após a sua instalação, e não sendo um material homogéneo ou inerte, não tem um comportamento estático. De facto, verifica-se que algumas reações químicas, nomeadamente as reações álcalis-sílica ocorrem de modo continuado.

As reações álcalis-sílica (*RAS*) apresentam-se como uma das condicionantes da durabilidade das estruturas de betão. Segundo o relatório de Miguel Santos e Jorge de Brito (Santos & Brito, 2008), são “*uma manifestação patológica que se desenvolve normalmente a longo prazo e para a qual ainda não existe uma solução aceitável, mas apenas alguns métodos de mitigação*”.

As condições ótimas para o seu desenvolvimento são a existência no betão de quantidade suficiente de álcalis, de quantidade suficiente de sílica potencialmente reativa e de quantidade suficiente de água.

Também segundo o mesmo relatório (Santos & Brito, 2008), a degradação do betão devido à presença de alcalis pode ter origem no próprio agregado, especialmente quando este é granítico.

Na barragem, todos os agregados utilizados provieram de rochas graníticas que se encontram em abundância na região (Figura 5), sendo assim uma possível origem para as RAS.



**Figura 5** – Maciços graníticos

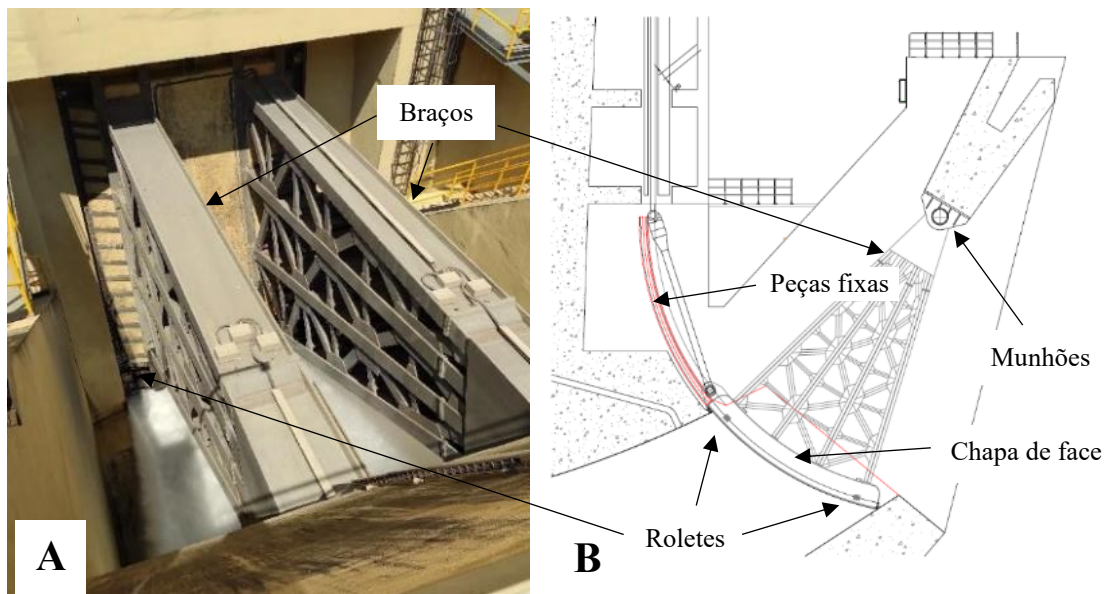
As reações RAS acima referidas provocam expansões internas no betão, levando ao desenvolvimento de tensões internas no material com consequentes deformações e ocorrência de fissuração do betão.

No caso presente, estas reações provocaram expansões (aumentos de volume) que levaram a deformações do paredão da barragem (Curtis, 2000) que se refletiram na posição dos eixos de rotação das comportas e na posição das peças fixas. As peças fixas instaladas nas laterais permitem que a comporta faça uma vedação eficaz. Como o nome indica, as peças são fixas, embutidas no betão e acompanham os movimentos que este faz. Assim, estas deformações, dificultam tanto a estanquidade da comporta na posição fechada como o seu movimento de abertura e fecho, transmitindo esforços consideráveis para as comportas.

A intervenção realizada teve como objetivo, adaptar o funcionamento e posição da comporta a estas condições de deformação e, na medida do possível, corrigir as deformações que se verificavam.

### 3 O projeto

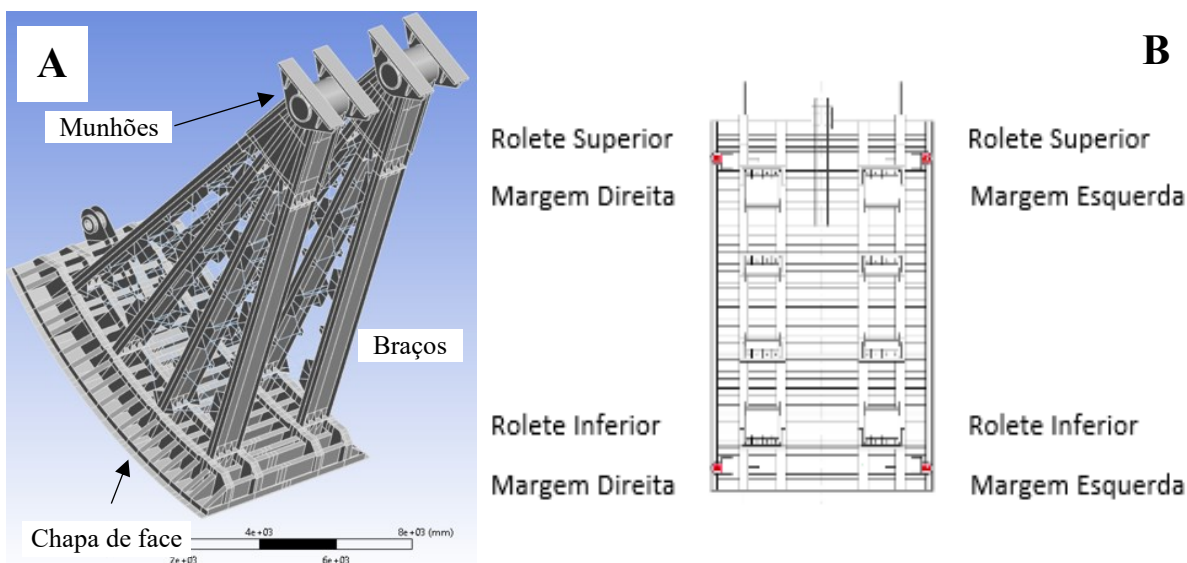
No presente caso, a comporta ensecadeira é uma comporta lagarta, tipo *bowstring* transparente, constituída por 4 elementos, com uma área frontal na ordem dos 112 m<sup>2</sup> e a sua movimentação é feita com recurso a um conjunto de barras de suspensão e um pórtico com capacidade de 400 toneladas. A comporta de serviço é uma comporta segmento com uma área frontal da ordem dos 54 m<sup>2</sup>, com 2 braços quádruplos e a sua abertura é assegurada por um servomotor hidráulico (Figura 6).



**Figura 6** – Comporta dos descarregadores. A – Fotografia do descarregador aberto; B – Desenho alçado lateral  
As comportas segmento são constituídas por:

- Uma chapa de face, curva, reforçada, que recebe a carga da água de montante,
- Dois braços, constituídos por quatro vigas cada um, travadas entre si, que transmitem a carga aos munhões,
- Os munhões que estão ancorados ao betão e transmitem a carga de montante à viga de betão.

As comportas são assim estruturas claramente tridimensionais (Figura 7). A sua posição no espaço é controlada pelos munhões e pela posição das vigas de betão onde estes estão encastrados. Funcionando as laterais da comporta em dois planos, paralelos entre si e perpendiculares à referida viga de betão.

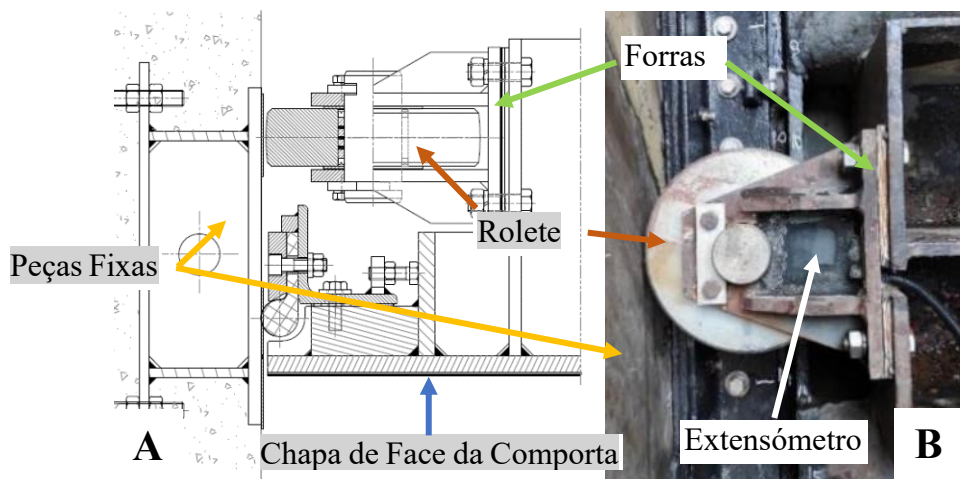


**Figura 7** – Comporta de serviço. A – Modelação 3D (SOLIDWORKS); B – Posição dos 4 roletes

A periferia da chapa de face está equipada com quatro estanquidades principais de modo a vedar a passagem de água, na posição da comporta fechada – uma estanquidade na posição superior (de facto duas, uma com a função de assegurar a estanquidade na posição fechada e outra, contra a chapa de face, com a função de controlar o jato de água vertical durante o processo de abertura da comporta), duas estanquidades laterais, a trabalhar contra as peças fixas, e uma estanquidade inferior a trabalhar contra a soleira.

Estas estanquidades na posição de comporta fechada, trabalham contra as várias peças fixas, assegurando a estanquidade da comporta. Durante o processo de abertura e fecho da comporta as estanquidades laterais deslizam sobre as peças fixas em todo o seu comprimento (parte inferior e superior).

Para que a comporta não entre em contacto com as peças fixas quando se verificam pequenas variações de posição dos planos laterais verticais ou de movimentos da própria comporta, a chapa de face está equipada com 4 roletes próximo dos cantos da comporta. A sua afinação na comporta é através do uso de forras (ou calços) como se pode ver na figura seguinte. Na Figura 8 – B observa-se também o extensómetro instalado, o qual permite monitorizar os valores dos esforços nesta zona da estrutura.



**Figura 8** – Rolete e estanquidade lateral; A – Desenho técnico; B – Rolete montado equipado com extensómetro

Estes roletes (equipados com um extensómetro e com a sua altura ajustada pelas forras), bem como a estanquidade lateral estão instalados na lateral da comporta, rolam e deslizam nas peças fixas. Estas são constituídas por pistas de aço inoxidável instaladas nas paredes de betão laterais. Na zona de passagem de água as peças fixas são fabricadas em aço martensítico 17-4, na zona acima da passagem de água as peças são em chapa de aço AISI 304 com 3mm de espessura, soldadas em cima uma viga de aço carbono encastrada no betão.

Durante os trabalhos da Empresa, observou-se que, em alguns casos, havia interferências da comporta com as peças fixas causando deformações plásticas localmente. Nomeadamente sulcos provocados pela chapa de face (Figura 9) e depressões causadas pela pressão exercida pelos próprios roletes (Figura 10).



**Figura 9** – Sulco causado pela chapa de face da comporta



**Figura 10** – Depressão causada pelos roletes

A função dos roletes fabricados em aço inoxidável é precisamente evitar que aconteça este tipo de ocorrências. Contudo no presente caso, apresentam cargas demasiado elevadas. E estas cargas dão origem a abertura e fecho da comporta não suaves e cargas laterais na comporta e nos munhões.

### *3.1 O procedimento de reparação e riscos associados*

A manutenção regular das comportas tem como principal objetivo assegurar que se encontram numa situação de correto funcionamento. Anualmente são ensaiadas e efetuada a manutenção dos sistemas óleo-hidráulicos – servomotores e postos de manobra e equipamentos e quadros elétricos associados. No que respeita à sua estrutura metálica é efetuada uma inspeção visual.

Durante as inspeções prévias realizadas foram verificadas as anomalias atrás descritas, as quais indicavam um comportamento anómalo da estrutura.

A presente intervenção da Empresa assumiu assim um carácter curativo. Numa fase anterior foi desenvolvido e instalado um sistema de controlo abordado no capítulo 4 deste documento.

Assim, a intervenção principal consistiu em criar e implementar um procedimento de recuperação da comporta e das peças fixas de modo a reduzir as cargas impostas aos roletes, assegurar a estanquidade requerida na posição fechada e permitir uma abertura e fecho sem constrangimentos ao longo do movimento das comportas.

Isto foi conseguido através do reposicionamento da comporta lateralmente, alterando o número das forras (ou calços) nos roletes (ver Figura 8). Antes de se poder realizar esse ajuste é necessário garantir que a chapa de face da comporta não entre em contacto com a parede. Para tal é necessário fazer uma maquinagem das peças fixas na parede.

Para controlar as operações a realizar é necessária informação relativa ao estado das peças fixas em toda a sua extensão, ao estado e à posição relativa da comporta em relação às peças fixas e aos esforços que a comporta exerce sobre as referidas peças fixas.

Essa informação é dada, por um lado, por uma série de controlos dimensionais e controlos topográficos e, por outro, pelo sistema de controlo de esforços mecânicos que foi instalado no passado, usando para o efeito extensómetros uniaxiais colocados em certos pontos da comporta.

Como é sempre possível reverter qualquer alteração das forras nos roletes, este ajuste não implica riscos especiais. O mesmo não se pode dizer das maquinagens das peças fixas, esta alteração é irreversível e, como tal acarreta maiores riscos.

A análise de risco efetuada permitiu avaliar esses riscos e definir as medidas a tomar para os controlar e as formas de os mitigar (Gomes, CHB-230-ET-0005 - Risk Analysis - Spillway Gate Modifications, 2020). Durante o projeto, esses riscos são monitorizados de modo a avaliar a sua evolução e tomar as medidas corretivas necessárias.

A avaliação do risco é feita de acordo a probabilidade de o risco acontecer e do impacto que esse risco pode ter. A tabela seguinte resume a classificação do risco considerada.

Risco (R)		Probabilidade (L)		
		Baixa	Media	Alta
Impacto (I)	Alto	3	6	9
	Medio	2	4	6
	Baixo	1	2	3

**Tabela 1** – Classificação do Risco

Apesar de haver potencialmente muitos riscos numa obra como esta, o foco da Empresa prendeu-se assim nas implicações da atividade mais critica: a maquinagem.

A maquinagem foi a atividade principal e foi a que ditou o caminho crítico da obra. Para além disso, esta é uma operação muito pouco comum neste tipo de intervenções e da qual não existe historial nem registos de problemas conhecidos.

As atividades de maquinagem tinham o potencial de criar implicações em alguns aspetos, nomeadamente:

- Funcionamento e operação da comporta – estanquidade na posição de fecho e movimentos de abertura e fecho;
- Implicações estruturais – novas posições da comporta que se refletem nos seus apoios (munhões) e, portanto, mudança de esforços a que está sujeita toda a sua estrutura.

Tornou-se assim fundamental que ao longo de todo o processo fossem monitorizados tanto a evolução das folgas na posição de comporta fechada, como a suavidade do movimento de abertura e fecho da comporta. Em contínuo, foram monitorizados os esforços nos vários elementos da comporta através do Sistema de Controlo (ver capítulo 4.1)

### 3.2 *A intervenção*

A Empresa organizou a sua intervenção de modo a poder intervir simultaneamente em duas comportas de uma forma decalada.

Foi constituída uma equipa de projeto, definido um processo de intervenção e uma sequência de trabalhos.

Foram aprovisionados em Portugal os materiais e os equipamentos necessários. Foram igualmente configuradas e construídas máquinas para funções específicas adequadas aos trabalhos a realizar.

Contudo e devido a diversos fatores como a pandemia ou a própria complexidade e problemas burocráticos e consulares, a intervenção sofreu vários adiamentos e interrupções. Acresce que as intervenções não podem ser efetuadas na época das chuvas, quer devido às más condições de trabalho, quer à necessidade de evitar a consignação de dois descarregadores durante essa época que é a mais crítica em termos de segurança da barragem. Num ano normal, a época de chuvas é a altura do ano em que há mais atividade nos descarregadores de cheias, como tal é necessária a máxima disponibilidade destes.

Quando inicialmente a obra tinha sido planeada para o intervalo de fevereiro a novembro de 2021, devido aos atrasos mencionados atrás, esta foi feita em duas fases. Numa primeira fase fez-se a intervenção nos descarregadores 1 e 2 começando em setembro e terminando em dezembro de 2021. Na segunda fase houve novamente atrasos que empurraram a continuação da obra de março para junho de 2022. Esta fase durou até setembro do mesmo ano e foram intervencionados os descarregadores 3 e 4 (Figura 11).

Nome da Tarefa	Nom de Recui	Duração	Início	Conclusão	Predecessora
Project 1, 3, 4		220 dias	Qui 24/02/22	Seg 07/11/22	
Team trip		2 dias	Qui 24/02/22	Sex 25/02/22	
Gate 4		84 dias	Seg 28/02/22	Sáb 04/06/22	
Preliminary Report		0 dias	Seg 20/06/22	Seg 20/06/22	42CI+14 dias
Gate 3		84 dias	Seg 06/06/22	Sáb 10/09/22	
Preliminary Report		0 dias	Ter 27/09/22	Ter 27/09/22	83CI+14 dias
Team trip		2 dias	Seg 12/09/22	Ter 13/09/22	83
Final Report		0 dias	Seg 07/11/22	Seg 07/11/22	85CI+35 dias

**Figura 11** – Gráfico de Gantt Excerto do planeamento de obra

### 3.2.1 A equipa de trabalho

O facto de se estar a trabalhar em 2 comportas em simultâneo (2 frentes de obra) levou à necessidade de reforçar a equipa. Assim, para conseguir realizar todas as atividades de reabilitação, foi necessária uma equipa constituída por:

- 1 engenheiro diretor de obra
- 1 engenheiro sénior
- 1 engenheiro de controlo de qualidade
- 1 técnico de maquinaria
- 1 técnico de segurança

- 1 contramestre
- 3 montadores serralheiros
- 2 soldadores serralheiros
- 5 ajudantes

Durante a obra, os três engenheiros reuniam diariamente, ao final do dia, para discutir o trabalho realizado durante o dia e fazer o planeamento das próximas ações a realizar nos dias seguintes.

Para além de dar apoio ao diretor de obra, acompanhando o trabalho nas duas frentes de obra, foi função do engenheiro de controlo de qualidade definir procedimentos de controlo e efetuar esses controlos.

Esta foi uma obra que teve lugar num sítio ermo e afastado de locais desenvolvidos. Como tal todos os problemas ou dificuldades que diariamente surgiram, tiveram de ser resolvidos localmente e com os meios à disposição. Desde problemas com equipamentos ou falta de consumíveis a questões do foro pessoal dos colaboradores ou ainda, paradoxalmente, da falta de energia elétrica.

### 3.3 *O processo de intervenção*

As atividades fundamentais desenvolvidas na intervenção foram definidas na seguinte sequência:

1. Trabalhos prévios - O objetivo desta fase foi a caracterização do estado das peças fixas da comporta. Assim como a definição dos trabalhos a efetuar.
  - a. Controlo de esforços com o sistema de controlo, em carga (sob a ação da carga hidrostática). Este ensaio é efetuado antes de se começarem, efetivamente, os trabalhos. Consiste na execução de um ciclo completo de movimentação da comporta. A partir da posição de comporta fechada, a comporta é aberta a 100% e posteriormente fechada. Os resultados nos roletes, nos braços e nos munhões foram depois tratados e analisados.
  - b. Ensecagem da comporta (instalação da comporta ensecadeira);
  - c. Controlo de esforços com o sistema de controlo, a seco (sem carga hidrostática).
  - d. Desmontagem das estanquidades laterais.
  - e. Novo controlo de esforços sem estanquidades laterais instaladas

- f. Controlo topográfico (feito pelo cliente) – da posição das peças fixas.
  - g. Controlo dimensional da comporta e da cadeia de suspensão.
  - h. Controlo de folgas (entre a comporta e as peças fixas) – nas posições fechada, aberta e algumas posições intermédias.
  - i. Definição da sequência de intervenção e os objetivos intermédios a alcançar.
2. Trabalhos preparatórios da 1ª fase dos trabalhos – Maquinagem da parte inferior das peças fixas
- a. Montagem de andaimes para acessos à parte inferior da comporta
  - b. Desmontagem da estanquidade inferior da comporta
  - c. Montagem da máquina de fresar na parte inferior da comporta
  - d. Controlo das condições de maquinagem
3. Trabalhos de maquinagem
- a. Maquinagem da zona de transição entre as peças fixas superiores e a blindagem (peças fixas inferiores).
  - b. Controlo da maquinagem com medidor de espessuras
  - c. Ensaio a seco de controlo
4. Finalização dos trabalhos na parte inferior da comporta
- a. Montagem da estanquidade inferior e desmontagem do andaime inferior
5. Trabalhos preparatórios da 2ª fase dos trabalhos – Maquinagem da parte superior das peças fixas
- a. Desmontagem das forras de aço inoxidável nas peças fixas
  - b. Montagem da gaiola de proteção anti queda no topo da comporta
  - c. Mudança da posição da máquina de fresar para a parte superior da comporta
  - d. Controlo das condições de maquinagem
6. Trabalhos de maquinagem
- a. Maquinagem das zonas superiores das peças fixas
  - b. Controlo da maquinagem com medidor de espessuras
  - c. Ensaio a seco de controlo
  - d. Remoção da máquina seguido de verificação e manutenção da mesma
7. Controlo geral final
- a. Ensaio a seco de controlo geral
  - b. Controlo de folgas
8. Trabalhos executados em paralelo

- a. Recuperação e proteção anticorrosiva das estanquidades laterais
- 9. Controlos e trabalhos finais
  - a. Controlo de esforços e ajuste dos calços na base dos roletes
  - b. Controlo de folgas – com a comporta na posição fechada e aberta
  - c. Remontagem das estanquidades laterais e retoques na proteção anticorrosiva
  - d. Ensaio final a seco com controlo de esforços
- 10. Ensaios de estanquidade
  - a. Ensaio de estanquidade e ajustes necessários às estanquidades laterais, inferior e superior
  - b. Remontagem das forras de inox nas peças fixas e passivação das soldaduras
  - c. Nova aplicação do esquema de proteção anticorrosiva nas zonas trabalhadas e nas zonas da comporta onde se apertam as estanquidades laterais
- 11. Ensaios finais
  - a. Remoção da comporta ensecadeira
  - b. Ensaio final em carga com controlo de esforços

Nos pontos seguintes são apresentados os problemas e os trabalhos desenvolvidos em algumas destas atividades.

## 4 Intervenção

### 4.1 Trabalhos Preparatórios – Controlo Dimensional

A intervenção em qualquer uma das quatro comportas começou sempre com a realização de dois ensaios e recolha de dados no SMEM (o qual será descrito no capítulo 4.1.1.), um em carga e outro depois de se instalar a ensecadeira e sem passagem de água.

Após esses ensaios iniciais, seguiu-se a desmontagem do conjunto das estanquidades laterais com o auxílio de uma grua móvel posicionada no topo da barragem (Figura 12).



**Figura 12** – Suspensão na grua do conjunto da estanquidade lateral

#### **Controlo dimensional - Instrumentos e técnicas de controlo**

Para enquadrar o tipo de técnicas de controlo utilizadas e desenvolvidas é necessário perceber as características do que se está a controlar.

As comportas a intervencionar têm, de acordo com o projeto, as dimensões principais de 6 por 9 m. As folgas laterais em relação às peças fixas laterais são de 5 mm, mais ou menos 4,5 mm e essas variações na folga devem ser suaves, ou seja, não pode haver variações abruptas ou degraus.

Assim, embora se esteja em presença de uma estrutura de grandes dimensões as tolerâncias são muito reduzidas.

De modo a ter um controlo dimensional de toda a estrutura e uma compreensão geral do comportamento da comporta ao longo do seu percurso de abertura, foram utilizadas três abordagens de controlo:

- Sistema de Controlo
- Levantamentos topográficos
- Controlo de folgas

As quais se apresentam nos pontos seguintes.

#### *4.1.1 Sistema de Controlo*

Num outro contrato, o primeiro trabalho efetuado pela Empresa na barragem foi conceber e instalar um sistema de controlo que permitisse obter os valores dos esforços e tensões nos locais críticos da estrutura das comportas.

Os dois grandes objetivos do sistema desenvolvido visaram procurar, com os diversos sensores instalados, uma caracterização do estado de tensão atual tão concreta quanto possível; e uma perspetiva evolutiva desse mesmo estado, procurando antecipar o comportamento da estrutura no futuro, dando inclusive origem a intervenções como a apresentada neste relatório.

Ao longo da intervenção o sistema permitiu uma análise contínua dos esforços na comporta, sendo assim uma ferramenta importante na tomada de decisão.

O sistema instalado permite avaliar o estado de tensões em diversos pontos da comporta, nomeadamente nos quatro roletes de guiamento onde o tratamento dos dados é mais rápido e a leitura é quase direta (ao contrário do que se passa nos braços ou munhões).

O sistema de controlo baseia-se na utilização de extensómetros uniaxiais e de rosetas. Usaram-se extensómetros uniaxiais onde a orientação das tensões principais é conhecida e rosetas onde esta orientação não é conhecida e varia ao longo do movimento da comporta.

Nos roletes pretende-se saber os esforços desenvolvidos por estes nas peças fixas (Figura 8). Foi efetuada uma simulação por elementos finitos dos roletes, de modo a permitir calcular os esforços nas peças fixas a que corresponde uma dada tensão no ponto em que foi instalado o extensómetro.

Note-se que em condições de projeto estes esforços seriam nulos e, portanto, qualquer valor de esforço medido tem origem num movimento lateral da comporta ou da peça fixa.

Nos braços da comporta, que em projeto são unicamente sujeitos a esforços de compressão quando a comporta está em carga, o que se pretende é obter as tensões. Que depois são igualmente comparados com os valores das tensões obtidos no cálculo por elementos finitos.

Sendo utilizados dois extensómetros, um de cada lado dos braços (margem esquerda/margem direita), quando se verificam diferentes tensões nos dois lados de um dado braço significa que há uma carga lateral nos roletes que se transmite aos braços na forma de um momento fletor. Sendo a média dos valores obtidos o valor dos esforços de compressão a que os braços estão sujeitos e a diferença entre estes valores obtidos e o valor médio das tensões são os valores das tensões devidos ao momento fletor.

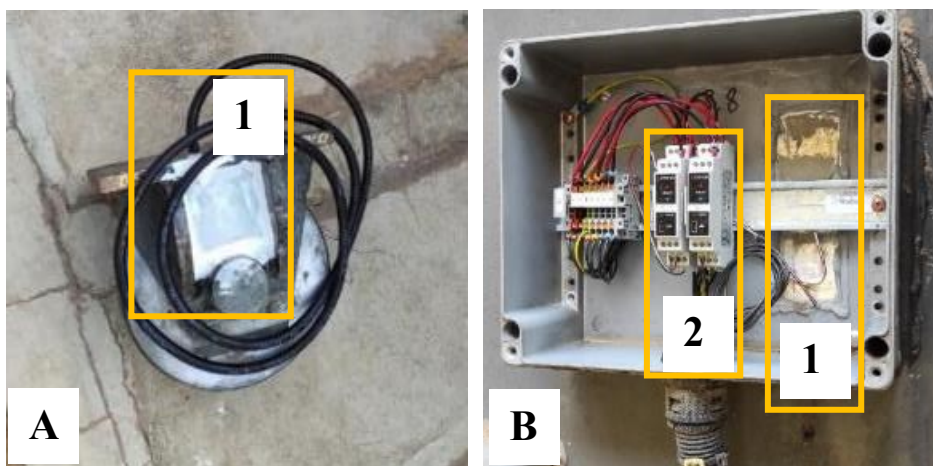
Nos munhões a situação é mais complexa. São utilizadas duas rosetas para medir o nível de tensões aí existentes. Instalada uma ao eixo dos braços com a comporta na posição fechada e a outra roseta a cerca de 45° abaixo da primeira, orientada na direção dos braços a cerca de metade do movimento de abertura da comporta. Nestes casos são utilizados os valores calculados da tensão equivalente de von Mises que, aquando da instalação do sistema, foram comparados e validados através de uma simulação e cálculo por elementos finitos a toda a estrutura.

De facto, se os valores nos roletes e nos braços são facilmente comparáveis e as conclusões dessas comparações são claras e conclusivas, nos munhões tal não se verifica. Nos munhões verificam-se efeitos que têm a ver com a sua própria geometria (as rosetas são inevitavelmente colocadas em zonas de rápida variação das tensões) e com a precisão na localização das rosetas.

Contudo para além dos valores obtidos numa campanha de medição é igualmente importante a evolução dos valores ao longo do tempo, ano após ano. Esta evolução permite, entre outros, estimar o comportamento futuro e, portanto, identificar e prever intervenções corretivas a realizar na comporta.

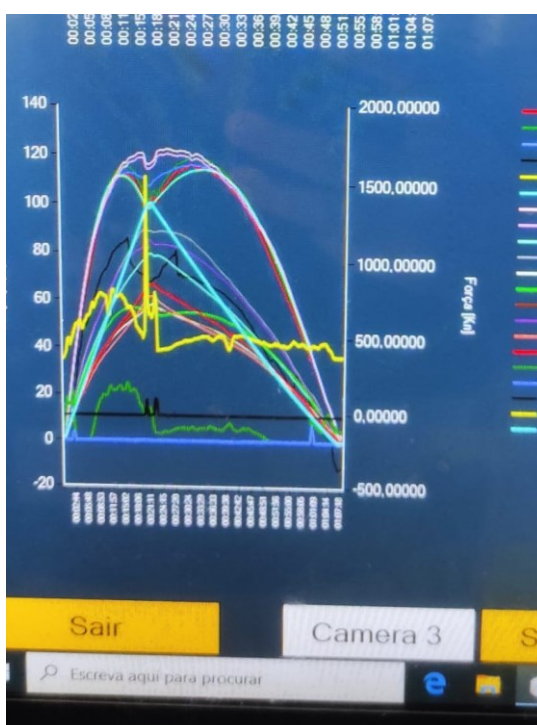
Por último é igualmente interessante comparar os valores obtidos nos 2 braços de uma dada comporta e nas oito comportas.

Na figura seguinte apresentam-se imagens da instalação dos extensómetros num rolete (Figura 13 A) e num braço da comporta (Figura 13 B) com a respetiva proteção mecânica (Figura 13 - 1) para evitar o ingresso de água no sistema e uma ponte de *Wheatstone* (Figura 13B - 2).



**Figura 13** – A – Rolete com instalação reparada e pronto a instalar; B – Extensómetro e equipamentos instalados no braço da comporta (1 – Extensómetros; 2- Ponte de Wheatstone)

Nas imagens seguintes (Figura 14) apresentam-se fotografias do ecrã do sistema SMEM (realizadas no local) mostrando os gráficos em tempo real. Nas figuras são apresentados, a diferentes cores, os valores de todos os extensómetros (4 nos roletes, 8 nos braços e 4 nos munhões) em simultâneo, ao longo de um movimento completo de abertura e fecho da comporta.



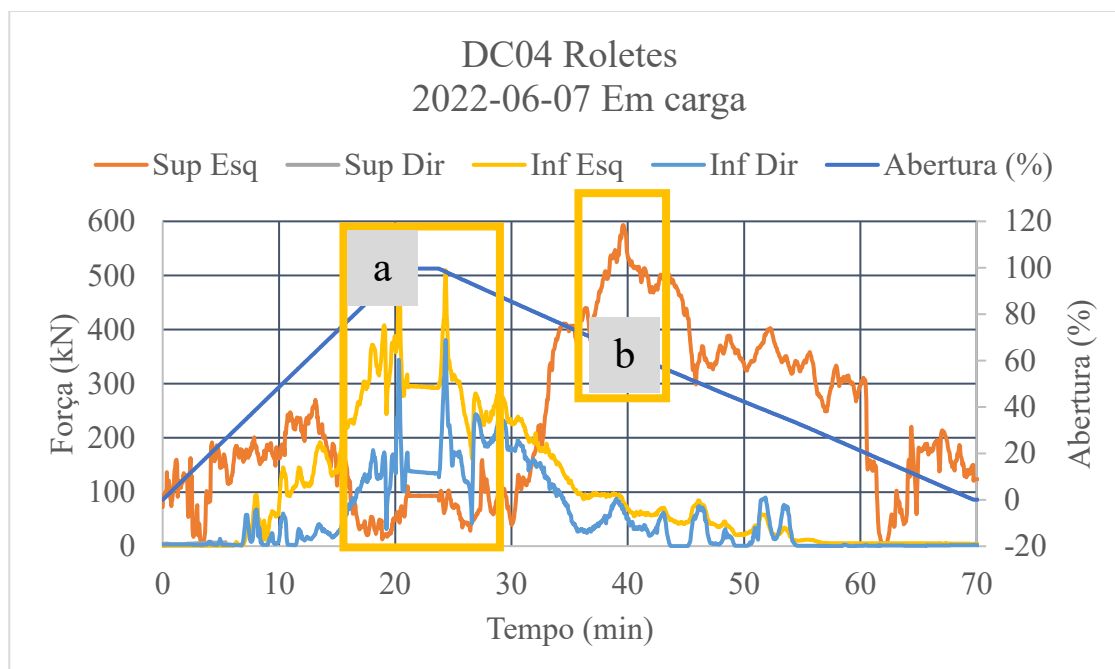
**Figura 14** – DC1 SMEM – Ensaio de abertura total. Em abcissas representa-se a variável tempo e em ordenadas as tensões medidas.

Estas fotografias ilustram como os gráficos gerados pelo sistema não são de fácil interpretação *in situ*. Apesar de, na imagem, apresentarem os valores corretos em absoluto, os zeros de cada

extensómetro não coincidem com o zero do gráfico. É assim necessário extrair os dados sem serem tratados para depois fazer esse tratamento numa folha de cálculo.

No gráfico da figura 15 estão representados os esforços nos quatro roletes e a abertura da comporta em percentagem:

- Sup Esq- rolete superior margem esquerda a laranja
- Sup Dir- rolete superior margem direita a cinzento (este rolete nunca entra em contacto e, como tal, não apresenta valores de esforços)
- Inf Esq- rolete inferior margem esquerda a amarelo
- Inf Dir- rolete inferior margem direita a azul.



**Figura 15** – SMEM – gráfico de esforços nos roletes

O encostar dos roletes às peças fixas na parede só se verifica quando há um movimento de aproximação/afastamento relativo da comporta em relação às peças fixas. A intensidade desse apoio varia com as irregularidades das próprias peças fixas.

São visíveis, ao longo do processo de abertura (0 a 100% de abertura com escala à direita), e posteriormente no fecho, os valores das cargas transmitidas aos três roletes que entram em contacto com as peças fixas. Nomeadamente na zona marcada “a” onde os roletes inferiores apresentavam sensivelmente o mesmo perfil de esforços, mas com valores diferentes e

especialmente elevados acima de 80% de abertura. Isto indica que as peças fixas estavam a “entalar” a comporta devido ao movimento das paredes.

A linha do rolete superior esquerdo apresenta uma grande disparidade de valores entre a subida e descida da comporta, nomeadamente no pico “b” onde o rolete suporta cerca de 60 toneladas. Esta diferença foi atribuída a um elevado atrito no munhão do lado oposto (margem direita). Este diferencial de atritos nos munhões atrasa o movimento de um dos lados da comporta causando um momento de torção na estrutura e a rotação da chapa de face. Levando a que um dos roletes superiores fique mais carregado e o outro menos carregado. No movimento de fecho ocorre o momento oposto invertendo os esforços nos roletes.

Os movimentos da comporta são feitos por um servomotor acoplado a uma barra de suspensão ligada ao centro da parte superior da comporta. A abertura é feita pelos dois motores do servomotor sendo possível desligar um reduzindo assim a velocidade de abertura para metade. O fecho é feito pelo peso próprio da comporta e através de uma válvula com regulação de fluxo. De forma a despistar qualquer efeito que a diferença nas velocidades de abertura e fecho possa ter, foi feito um ensaio com velocidades iguais e não se verificaram diferenças nos esforços.

O rolete superior direito não entra em contacto com as peças fixas e, como tal, não apresenta esforços no gráfico.

O sistema de controlo permitiu afirmar que essas cargas atingem cerca de 30 a 40 toneladas em quase todas as comportas e 60 toneladas na comporta 4 o que confirma que as comportas estão sujeitas a esforços demasiado elevados (relembra-se que neste tipo de comportas, em projeto e sem deformações no betão, os roletes não se apoiam nas peças fixas, funcionando apenas como batentes ou limites, de modo a proteger e evitar que a comporta entre em contacto com as paredes).

De facto, existem grandes esforços devido às deformações ao longo das peças fixas, motivados pela expansão do betão, agravados pelo próprio movimento da comporta que é induzido pelo movimento da viga de betão onde estão montados os munhões. Estas deformações estão patentes no levantamento topográfico realizado pelo cliente (ver capítulo 4.1.2).

No fundo, verifica-se uma combinação de uma translação lateral e de uma rotação da comporta aliados às deformações das paredes de betão.

O objetivo da intervenção é reduzir estes esforços, melhorando o posicionamento da comporta em relação às peças fixas. Teoricamente isso é possível de duas formas: movendo os munhões de modo a levar a comporta à sua posição teórica ou adaptando a posição das peças fixas de modo a acomodar a nova posição da comporta.

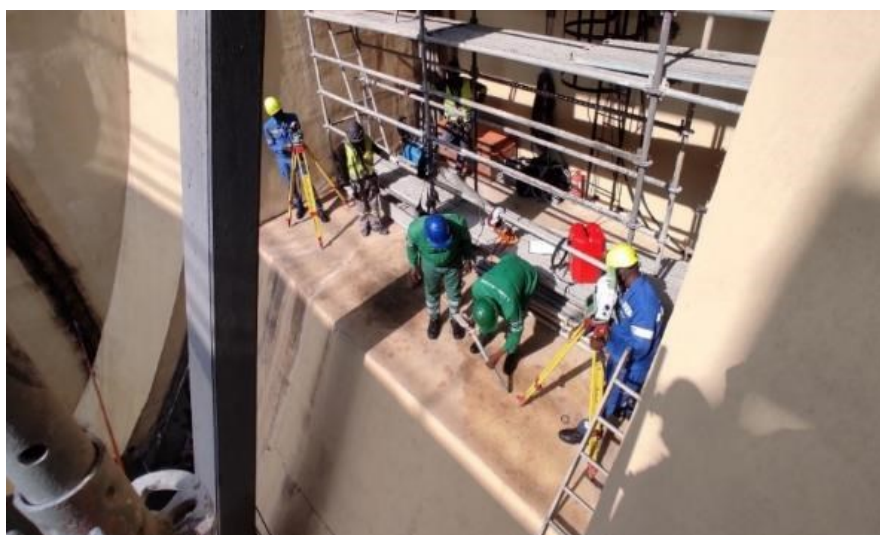
Devido às grandes dimensões e massa da comporta, reposicionar os munhões e a comporta é uma operação de extrema dificuldade. Assim, essa abordagem não foi considerada o que levou à seleção da opção de intervir diretamente nas peças fixas.

A maneira mais fácil de adaptar as peças fixas é proceder a uma maquinagem das mesmas, usando para o efeito uma máquina de fresar especificamente desenhada para esta operação, instalada na própria comporta e com o objetivo de retirar o material deformado nas zonas dos roletes e da passagem da chapa de face da comporta.

#### 4.1.2 *Levantamentos topográficos*

Tal como com o SMEM, o levantamento topográfico para controlar as posições relativas da comporta e peças fixas foi feito previamente. No caso presente foi feito em conjunto com os primeiros trabalhos de desmontagem, o que não interferiu com a obra (Figura 16).

Mesmo utilizando equipamentos sofisticados, como uma estação total de topografia, as condições de controlo eram difíceis devido a dificuldades de posicionamento do equipamento.

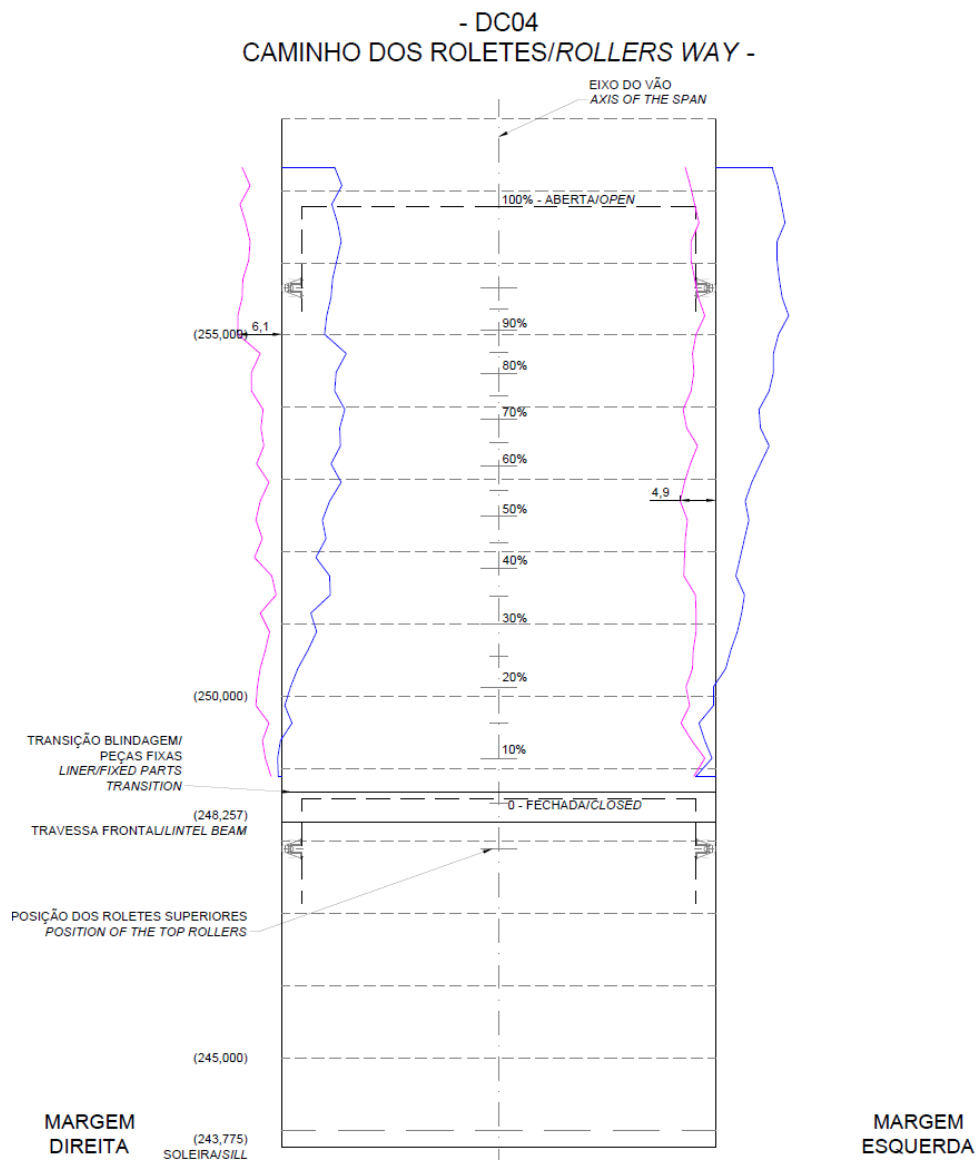


**Figura 16** – Equipa a realizar levantamentos topográficos

De facto, os próprios braços da comporta obstruíam as melhores linhas de visão levando a que os levantamentos tenham sido feitos com alguma dificuldade e com um ângulo muito fechado levando a maiores erros de leitura.

Por outro lado, não eram os valores absolutos da posição da comporta ou das peças fixas que interessavam. O que de facto interessava, é a posição relativa da comporta relativamente às peças fixas/ blindagem.

Apesar dessas dificuldades, os levantamentos topográficos permitiram, com um certo grau de certeza, traçar a posição das peças fixas (Figura 17).



**Figura 17** – Levantamento topográfico das peças fixas no DC4 – a linha cor-de-rosa representa o mesmo que a linha azul, mas com uma redefinição dos eixos de referência.

#### 4.1.3 *Controlo de folgas com palpa folgas*

Por último, e já depois de se retirarem as estanquidades laterais, fez-se o controlo das folgas entre a chapa de face da comporta e as peças fixas de ambos os lados da comporta. Com

recurso a um palpa folgas, ajustam-se o número de lâminas de modo a preencher a folga entre as superfícies e depois mediu-se a espessura total das laminas com um paquímetro.

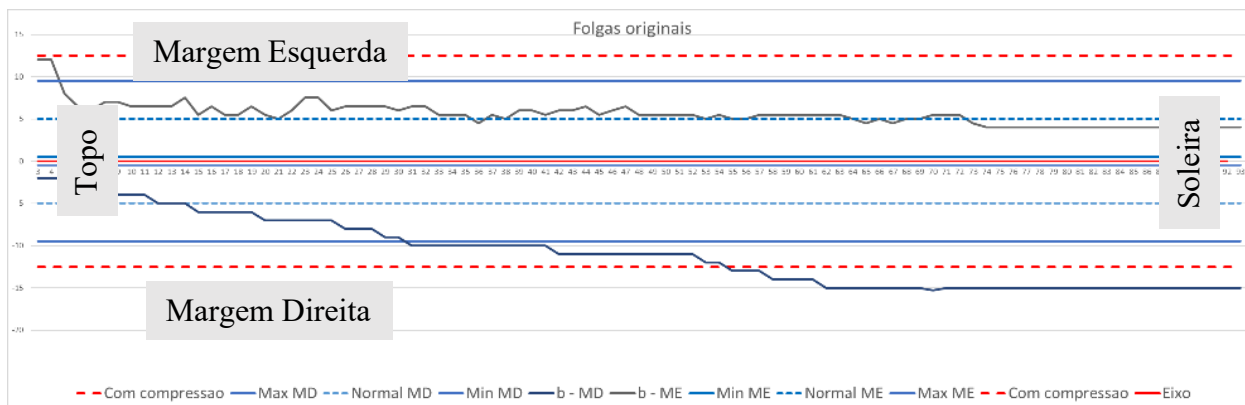
Antes de se mexer nos calços dos roletes, este método deu, de uma forma imediata, o afastamento da comporta às peças fixas antes da intervenção e permitiu perceber o que se teria de maquinar e onde.

Por facilidade, foram usados como referência os parafusos que apertam a estanquidade à comporta numerados de 1 a 93 em toda a altura da comporta e em ambas as margens. A distância entre parafusos é de 10 cm conduzindo a uma altura da comporta de 9,3 m. A numeração foi feita tanto na comporta como nas paredes. Assim, com a movimentação da comporta, foi possível fazer a correlação da numeração inscrita na parede com a da nova posição da comporta (Figura 18).



**Figura 18** –Numeração de parafusos na comporta, na estanquidade e na peça fixa

A primeira medição foi feita com a comporta fechada (Figura 19) e as subsequentes em incrementos de abertura de 10%, até chegar a abertura total. Cada recolha, do valor das folgas, demora algum tempo, como tal e de modo a agilizar o processo, as medições feitas nas aberturas intermédias foram feitas apenas nas marcações onde a comporta se encontrava mais próxima da parede.



**Figura 19** – Medição de folgas em milímetros com a comporta fechada – Na esquerda topo da comporta, à direita soleira. Altura da comporta cerca de 9 metros. Marcações no eixo das ordenadas de 10 em 10 cm correspondendo aos parafusos de fixação das estanquidades. Marcações nas abcissas de 5 em 5 mm correspondendo às folgas da comporta com as peças fixas.

Na figura acima a linha vermelha horizontal ao centro, representa os dois lados da comporta (na realidade separados por 6 m). As várias linhas azuis (e vermelhas a tracejado) para cima e para baixo representam os limites de regulação (teóricos e de origem) das estanquidades laterais à esquerda e à direita (respetivamente). Mínimo 0,5 mm e máximo 12 mm. As duas linhas irregulares a cinzento representam a posição das peças fixas laterais, sendo a distância à linha vermelha central a distância às peças fixas ao lado da comporta.

Neste caso, a zona escolhida para repetidos controlos foi a zona que começa no parafuso 18 até ao parafuso 1. Nas várias aberturas da comporta subsequentes foram também medidas as folgas nos pontos acima do ponto 1. Por exemplo, para a abertura de 10%, o ponto 1 da comporta corresponde ao ponto -9 nas peças fixas.

Como se pode ver na figura acima, os valores das folgas introduzidos numa folha de cálculo permitem traçar um gráfico da posição da comporta em relação às peças fixas, identificando eventuais translações e rotações da comporta em relação às peças fixas. Permitem também identificar as diversas lombas e depressões que se verificam nas peças fixas e blindagem. No exemplo da Figura 19, na margem direita o topo da comporta está com pouca folga, mas dentro do limite teórico enquanto a zona inferior tem demasiada folga e está para além do limite teórico.

Com estes três tipos de abordagem conseguiu-se ter uma ideia de qual era a posição das peças fixas no espaço assim como a posição da comporta em relação às peças fixas ao longo do processo de abertura.

Munidos desta informação, pôde-se então avaliar e perspetivar as maquinagens a realizar.

## 4.2 *Maquinagem*

Como referido anteriormente, a comporta movimenta-se entre peças fixas embutidas no betão apoiando-se principalmente por meio de roletes e também pela estanquidade lateral.

Na zona inferior, onde a água passa, essas peças fixas têm também a função de blindagem e, como tal, o aço tem de apresentar elevada resistência ao desgaste. Por essa razão, na construção da barragem, foi escolhido um aço inoxidável martensítico tipo 17-4, o qual apresenta elevada dureza (ver Tabela 2) e conseqüentemente elevada resistência ao desgaste. As chapas instaladas tinham uma espessura inicial de 20 mm.

As zonas acima da passagem de água têm embutida no betão, uma viga em caixa de aço carbono S275 com chapas de aço inoxidável, com espessura de 3mm, soldadas por cima (Figura 8)(ver capítulo 4.3 Reinstalação das forras em aço inoxidável).

As operações de maquinagem foram realizadas diretamente no aço da blindagem, na parte inferior, sendo que na parte superior as chapas de aço inoxidável foram numa 1ª fase retiradas, foi depois executada a maquinagem no aço ao carbono, e posteriormente novamente instaladas novas forras de aço inoxidável.

### 4.2.1 *Máquinas de Fresar*

A maquinagem realizada foi feita com recurso a duas máquinas especificamente construídas para o efeito, tendo sido idealizadas pela empresa e construídas por um fornecedor deste tipo de equipamentos feitos à medida.

Ambas as máquinas permitem a regulação da profundidade de corte, regulação da velocidade de rotação e são instaladas diretamente na comporta. A velocidade de avanço é dada pela própria velocidade de abertura da comporta, a qual é possível regular com algumas limitações.

A máquina nº1 (Figura 20), mais antiga, foi projetada durante a primeira intervenção em 2019 para fazer a maquinagem das peças fixas acima da zona da passagem de água e para ser montada diretamente na parte superior da comporta. Na figura é possível ver o motor, a carenagem que protege a correia de transmissão e o corpo da fresa.



**Figura 20** – Máquina nº1 instalada no topo da comporta a maquinar as peças fixas superiores.

Durante essa intervenção, percebeu-se que a máquina nº1 não seria suficiente para chegar aos pontos mais baixos e que seria também necessária a maquinagem na zona de passagem de água. Essa zona, e com este tipo de máquina, é apenas acessível pela parte inferior da comporta.

Como tal, foi projetada a máquina nº 2 (Figura 21), que permite a sua instalação na parte inferior da comporta, tendo sido projetada com altura reduzida (do centro da fresa à base da máquina) de modo a atingir um maior comprimento de áreas a maquinar. Na figura é visível o motor (azul) que aciona a fresa através de uma correia (com a carenagem a preto à direita). O corpo da fresa encontra-se por trás do motor e neste caso está a realizar o trabalho de maquinagem nas peças fixas na parede à esquerda da máquina.



**Figura 21** – Máquina nº2 – instalada na parte inferior da comporta a maquinar as peças fixas inferiores

#### 4.2.2 Aços a maquinar

Para a seleção e aprovisionamento de pastilhas de corte fez-se uma análise dos elementos de projeto. Para a maquinagem das peças fixas com e sem passagem de água foram considerados dois tipos de aço:

- Aço inoxidável martensítico 17-4 de elevada dureza para a zona de passagem de água
- Aço carbono do tipo S235

Para o aço martensítico e dentro das recomendações do fornecedor, foram selecionadas as pastilhas com maior resistência ao desgaste.

Para o aço carbono foram selecionadas umas pastilhas com alguma resistência pois já se esperavam variações de dureza nas zonas termicamente afetadas pelas soldaduras das chapas de aço inoxidável.

De facto, durante o trabalho verificou-se que foi necessário maquinar 3 tipos de aço. Os dois mencionados anteriormente e também as próprias chapas de aço soldadas por cima do aço ao carbono. Esse é um aço inoxidável tipo AISI 304L e não resultou num problema pois existiam em obra pastilhas adequadas e em quantidade suficiente.

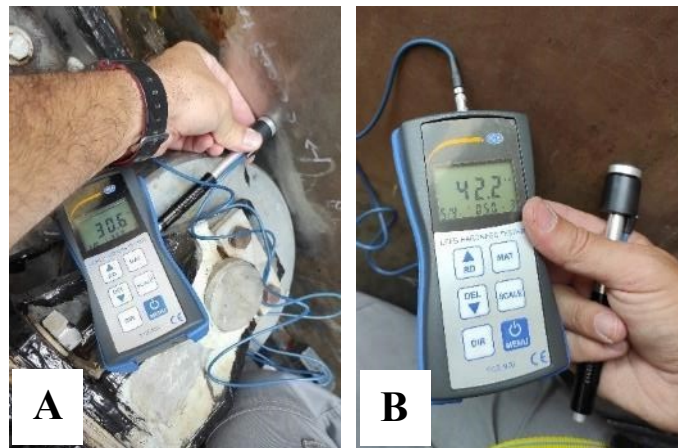
Observou-se que dos aços maquinados, um deles era consideravelmente mais duro do que os outros (ver Tabela 2 – Registo de durezas nos diferentes tipos de aço) pelo que as operações de maquinagem desse aço demoraram consideravelmente mais tempo que nos restantes aços.

#### 4.2.3 Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza tiveram dois objetivos básicos:

- Determinar o tipo de aço de modo a permitir definir os parâmetros de soldadura e os eletrodos a utilizar nas reparações efetuadas;
- E definir os parâmetros de maquinagem para os vários aços.

Usou-se para o efeito um equipamento para medição de durezas, portátil, como se observa na Figura 22.



**Figura 22** – Medição da dureza A – Blindagem do DC2; B – Blindagem do DC1

O equipamento portátil usado, para os ensaios de dureza foi o PCE 900 o qual funciona com base no princípio da dureza de Leeb de acordo com a Norma ISO 16859, sendo um método de ensaio dinâmico, usando uma técnica de ressalto, no qual um corpo de impacto, com uma ponta esférica de carboneto de tungsténio, é projetado contra a superfície do material a ensaiar, medindo-se as diferentes velocidades antes e depois do impacto. A relação entre as duas velocidades dá a dureza do material de acordo com a seguinte equação.

$$HL = 1000 * \left( \frac{V_B}{V_A} \right)$$

Onde:

- HL – Dureza Leeb
- VB – velocidade depois do impacto
- VA – velocidade antes do impacto

Este é um equipamento portátil, não destrutivo, de fácil utilização e tem em memória tabelas que permitem uma conversão rápida e aproximada a outros tipos de dureza como Rockwell C.

É, no entanto, necessário ter em mente que tal como nos métodos tradicionais, não há uma comparação ou conversão direta entre os diferentes métodos. O que existe são curvas de comparação empíricas e específicas de cada material e o equipamento faz essa conversão de acordo com as tabelas de conversão que tem instaladas. No presente caso sabe-se que todos os materiais são aços (inoxidáveis e ao carbono) e que os resultados noutras escalas são apenas uma aproximação aceitável para uma maior familiaridade de unidades.

A tabela 2 resume as medições de dureza realizadas nos diferentes aços analisados, em vários pontos em zonas lisas e livres de impurezas ao longo das peças de modo a despistar quaisquer erros de medição. Tendo o equipamento a apresentar os valores convertidos de dureza Leeb para valores de dureza Rockwell C, apresentam-se na tabela seguinte os valores medidos.

Peça	Material	Dureza (Rockwell C)									
Peças fixas antigas	Aço ST37.2	24.9	26.7	27.9	26.4	26.5	25.7	27.1	26.3	26.9	
Peças fixas novas	Aço Inoxidável AISI 304L	35.4	34.1	32.3	33.9	33.1	34.3	34.7	33.2	34.0	
Rolete	Aço Inoxidável X20Cr13	29.0	29.8	28.8	30.1	29.4	30.2	29.0	28.9	29.8	
Blindagem (todas exceto DC02 ME)	Aço Inoxidável Martensítico 17/4	42.2	41.2	39.9	40.8	41.0	40.9	41.5	40.4	41.2	
Blindagem (DC02 ME)	Aço Inoxidável (desconhecido)	30.6	31.2	30.1	30.2	30.5	30.0	30.9	30.7	30.4	
Peça fixa (viga embutida)	Aço Carbono S235	20.9	21.2	20.9	19.7	21.2	19.9	20.8	21.2	22.0	

**Tabela 2** – Registo de durezas nos diferentes tipos de aço

Como se pode verificar na Tabela 2, há uma considerável diferença nas durezas dos diferentes aços inoxidáveis, nomeadamente entre o aço martensítico e os outros. De notar também que, ao contrário do esperado, a blindagem/peça fixa do descarregador 2 (DC02 ME) apresentou valores de dureza na ordem dos 31HRC, valor este claramente inferior ao das blindagens nos restantes descarregadores (41HRC). Essa diferença também se fez notar aquando da maquinação. Durante a maquinação no DC2 foi possível realizar a operação de corte com maior penetração e velocidade de rotação, mantendo o diâmetro da fresa.

A SOREFAME foi a empresa fornecedora de todos estes equipamentos aquando da construção da barragem, não existindo, contudo, nenhum registo ou documentação que indique esta diferença referente aos aços da blindagem. Também não existe nenhum registo de uma substituição da blindagem numa fase posterior à sua construção.

No entanto, após quase 50 anos de funcionamento, não se observaram danos ou desgaste causados pela passagem de água que pudessem advir dessa dureza inferior ao projetado.

#### 4.2.4 *Controlo de maquinagem*

##### **Através do sistema de controlo**

Como mencionado previamente, ao longo de todo o processo (e regularmente) foram monitorizados os esforços na estrutura e analisada a sua evolução. À medida que a maquinagem era realizada, a posição da comporta pôde ser ajustada na direção da zona maquinada, retirando calços aos roletes. E alterando-se, portanto, os valores dos esforços. Medidos.

A análise dos dados obtidos com o sistema de controlo permitiu perceber se o objetivo era atingido e qual eram as localizações a maquinar seguidamente.

##### **Através da medição de espessuras**

A medição de espessuras foi realizada através de ensaios por ultrassons, de acordo com a Norma EN ISO 16809, usando o equipamento *Sonatest T-Gage V*.

Neste método, ondas sonoras de alta frequência são emitidas pelo aparelho e propagam-se através do material a ser medido. Durante o ensaio uma pequena quantidade de gel acoplante é aplicada para garantir um bom contato entre o transdutor de ultrassons e a superfície do material a medir. Depois, o transdutor emite um pulso de ondas sonoras que atravessa o material e é refletido na interface entre o material e a superfície oposta. O aparelho depois de receber os sinais refletidos mede o tempo que o pulso leva para percorrer o material e retornar, e sabendo a velocidade de propagação do som no material, calcula a espessura do material.

Sendo difícil controlar a espessura maquinada, inverteu-se o problema. Começou por se controlar a espessura do material existente e repetiu-se o controlo à medida que se ia fazendo a maquinagem. A diferença das duas medições deu a informação sobre a espessura do material removido.

No presente caso, começou-se por fazer um conjunto de medições gerais, a intervalos regulares, de todas as peças fixas. Seguidamente identificaram-se as áreas a maquinar, realizou-se a maquinagem e tornou-se a medir.

A Figura 23 apresenta uma linha de pontos com o levantamento de espessuras na superfície maquinada.



**Figura 23** – Medição de espessuras com o sonatest T-Gage V – marcação de espessura remanescente DC1 MD  
Durante a operação de maquinagem, foi importante acompanhar o operador periodicamente na medição de espessuras e no ajuste da máquina de modo a assegurar que o trabalho seguia de acordo com o planeado.

#### 4.2.5 *Alinhamento das fresas*

Quanto à instalação da máquina na comporta, a 1ª questão que se colocou, teve a ver com o correto alinhamento da máquina em relação à superfície a maquinar. Foi muito importante assegurar que o plano de corte fosse paralelo ao plano das peças fixas. Caso contrário seria maquinada uma superfície “inclinada”, o que não seria aceitável.

Nas primeiras tentativas (e no caso observado na Figura 23) verificaram-se desfasamentos da ordem dos 3 a 4 milímetros de profundidade de corte para uma largura de corte total de 300mm (neste caso e em várias passagens da máquina) entre as duas extremidades das pistas das peças fixas. Na Figura 24 é claramente visível esse desfasamento nos valores apontados diretamente na peça fixa. Esse desnível, obrigou a um realinhamento da máquina e posterior correção da superfície maquinada. Esse realinhamento foi feito rodando a máquina inteira na sua base.



**Figura 24** – Medição de espessuras – marcação de espessura remanescente (detalhe)

Para alinhar a máquina depois de verificado o desalinhamento, foi necessário abrir a comporta até uma zona onde ainda não havia nenhum desbaste realizado e aí fazer uma rotação da máquina. A Figura 25 apresenta a rotação necessária a esse alinhamento do caso acima descrito.



**Figura 25** – Alinhamento da máquina – Base da máquina 1

O alinhamento destas máquinas não foi de solução fácil pois não havia boas referências para o plano a maquinar. A melhor aproximação possível era a superfície do próprio aço ao carbono ou a sua espessura antes de se maquinar. Era a aproximação mais aceitável pois não é possível garantir que as superfícies foram instaladas corretamente ou que não sofreram alterações desde a altura da sua instalação.

#### 4.2.6 *Estratégia de maquinagem*

Com a execução da própria maquinagem foi possível pôr em prática algumas ideias sobre a estratégia de maquinagem. Por outras palavras, tendo em conta todas as limitações da própria máquina, do seu movimento, da superfície a maquinar e dos aços, foi necessário estabelecer a melhor metodologia para conseguir transformar superfícies onduladas em superfícies planas.

Como em qualquer operação de maquinagem, os principais parâmetros de corte são a velocidade de avanço e a profundidade de corte. É também necessário considerar a velocidade de rotação, o tamanho da fresa e a quantidade de pastilhas a utilizar.

Neste caso, visto ser uma operação totalmente diferente da aplicação típica em máquinas industriais, foi necessária a contribuição de todos os envolvidos na otimização de todos os parâmetros. Na máquina desenvolvida, apesar de se ter algum controlo sobre os parâmetros mencionados atrás, esse controlo não é, em nenhum caso, facilmente mensurável. No caso da velocidade de avanço, o único controlo possível foi realizado com o ajuste do servomotor da comporta usando os dois motores (para a velocidade máxima) ou apenas um para reduzir a velocidade para metade.

Assim, o ajuste foi feito de acordo com a análise sensorial e por experiência tanto do operador como dos responsáveis das operações em questão. Esta análise baseou-se, entre outras coisas, nas vibrações e sons que a maquinagem gerava, na cor das aparas e também no encravamento da própria fresa nas peças a maquinar e consequente degradação rápida das pastilhas usadas. O uso de lubrificante de corte não foi tido em conta visto haver o risco de este ir parar ao rio.

Após vários ensaios chegou-se, em resumo, às seguintes condições de operação:

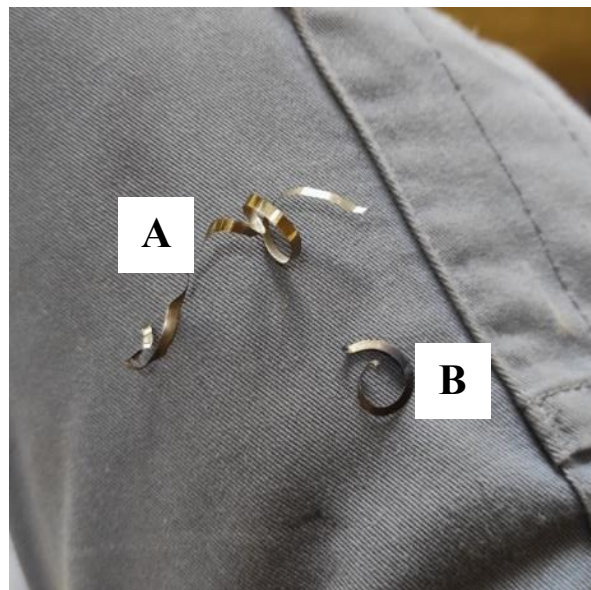
Materiais	Parâmetros de Corte			
	Velocidade de avanço	Profundidade de corte	Velocidade de corte	Número de pastilhas na cabeça de corte
Aço carbono, tipo s275	Metade da velocidade máxima	Elevada	Elevada	8 pastilhas
Aço inoxidável, tipo AISI 304L	Velocidade máxima	Baixa (~0.1mm)	Muito reduzida	2 pastilhas
Aço martensítico, tipo 17-4	Velocidade máxima	Muito Baixa (~0.05mm)	Muito reduzida	1 pastilha

**Tabela 3** – Condições de operação de fresagem dos aços

Na Figura 26 apresentam-se imagens de aparas removidas durante a maquinagem, do aço martensítico e do aço ao carbono.

A apara A de aço inoxidável apresenta uma cor mais clara e com aspeto de ter atingido temperaturas pouco elevadas (ao contrário de algumas aparas, que no início da operação apresentaram tons de azul). A largura da apara corresponde ao avanço por pastilha e a espessura à penetração na peça.

A apara B de aço ao carbono, cortada com muito maior penetração, maior número de pastilhas e menor velocidade de avanço, apresenta tons azulados indicando ter atingido uma maior temperatura na própria apara. Neste caso, a largura representa a profundidade de corte e a espessura indica o avanço por pastilha.



**Figura 26** – Tipo de aparas removidas: A – Aço inoxidável; B – Aço carbono

Estas afinações dos parâmetros permitiram assim reduzir bastante as vibrações da máquina que, por sua vez, diminuiu drasticamente os encravamentos e a quantidade de pastilhas de corte gastas/destruídas durante o processo. Conseguiu-se assim uma operação com menos paragens para troca de pastilhas e maior rapidez de todo o processo apesar do menor rendimento efetivo a cortar o aço inoxidável.

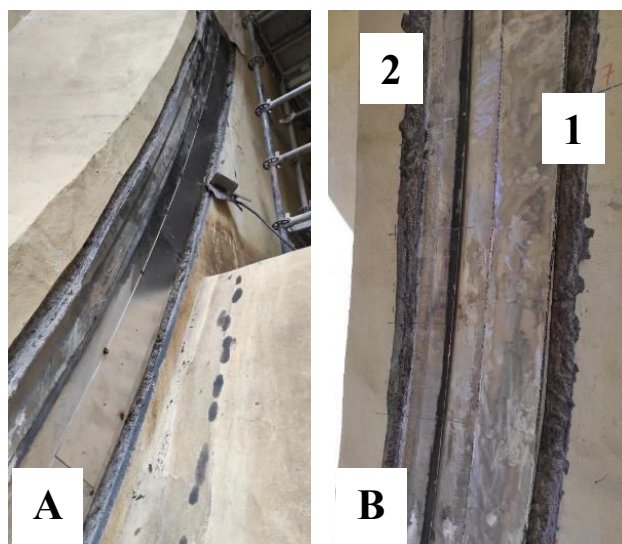
#### 4.3 *Reinstalação das forras em aço inoxidável*

Originalmente-as chapas de aço inoxidável usadas para receber a carga dos roletes e permitir o deslizamento das estanquidades laterais tinham 3 mm de espessura e estavam soldadas ao perfil de aço ao carbono embutido no betão. Havendo um limite máximo do material que pode ser retirado ao perfil e para se conseguir ainda mais folga entre a comporta e parede, a Empresa sugeriu reduzir a espessura das novas chapas a instalar. Esta redução da espessura das chapas

foi feita apenas no caminho das estanquidades (Figura 27 – 1) onde não existem as solicitações mecânicas como as que são causadas pelos roletes.

Para instalar as novas chapas nos caminhos do rolete e da estanquidade foi necessário criar e certificar dois procedimentos de soldadura e soldador.

Após a maquinagem, foi necessário proceder à instalação das novas chapas de aço inoxidável. Começou-se por colocar as chapas no sítio, com pontos de soldadura e fez-se mais um movimento de abertura e fecho da comporta para verificações visuais e registo e análise de esforços. Depois de se verificar que estava tudo dentro do esperado foi efetuada a soldadura final (Figura 27)



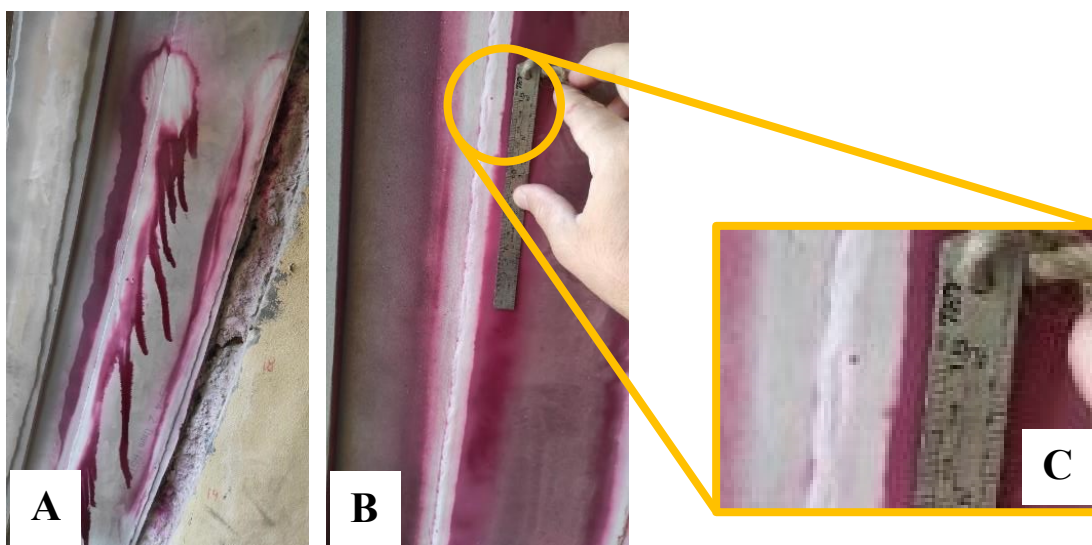
**Figura 27** – A – Instalação de forras; B – Soldadura (1 – Caminho da estanquidade, 2 – Caminho do rolete)

No caso das soldaduras das forras laterais do caminho das estanquidades, estas não sofrem esforços consideráveis e a norma que regula o *design* de estruturas hidráulicas em metal DIN 19704 não refere a necessidade da execução de ensaios não destrutivos. No entanto, o cliente solicitou que fossem realizados testes de líquidos penetrantes, os quais foram realizados de acordo com a norma ISO 3452.

O ensaio por líquidos penetrantes é um método não destrutivo utilizado para detetar discontinuidades superficiais, como fissuras, poros e outros defeitos que possam afetar a integridade estrutural ou a funcionalidade de uma peça. Este ensaio é particularmente importante em construção soldada. Segundo a norma, a metodologia do ensaio é a seguinte:

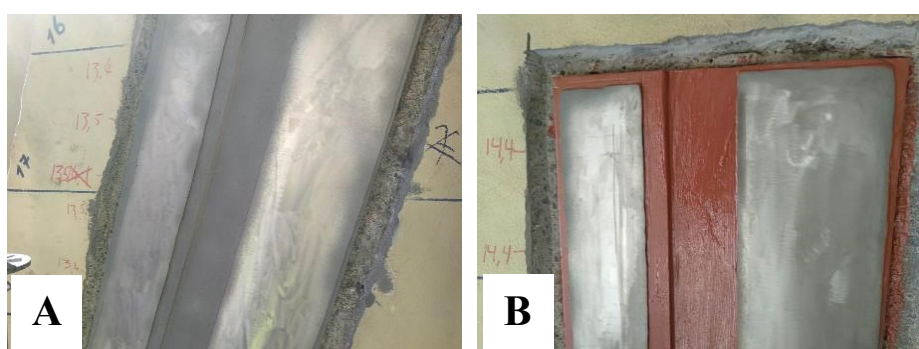
1. Preparação da superfície: A primeira etapa consiste em limpar cuidadosamente a superfície da peça a ser testada. Qualquer sujidade, tinta ou restos de soldadura devem ser removidos para garantir que não interfiram na deteção das descontinuidades.
2. Aplicação do líquido penetrante: O líquido penetrante, que é geralmente uma substância colorida ou fluorescente com elevado nível de molhabilidade e capilaridade, é aplicado na superfície da peça. Dependendo da temperatura deixa-se atuar durante 10-30 min, para permitir que o líquido se infiltre em quaisquer descontinuidades presentes.
3. Remoção do excesso: Após o tempo de penetração, o excesso de líquido é cuidadosamente removido da superfície, usando água e um pano ou um pano embebido em solvente. Deve-se ter atenção para não remover o líquido das descontinuidades, caso contrário, a deteção será comprometida.
4. Revelação: O próximo passo envolve a aplicação de um revelador, geralmente em forma de pó, sobre a superfície tratada. O revelador ajuda a tornar as descontinuidades visíveis, pois absorve o líquido penetrante que permaneceu nas fissuras ou poros.
5. Inspeção: a peça em questão é examinada cuidadosamente à procura de indicações de descontinuidades. As descontinuidades aparecerão como linhas ou manchas coloridas.
6. Limpeza final: Após a inspeção, é feita uma limpeza final da peça.

Todos os ensaios feitos na barragem seguiram este procedimento de ensaio. Alguns dos ensaios feitos em zonas críticas deram indicações que originaram reparações. Outros ensaios, como o da figura abaixo (Figura 28 – B e C), revelaram descontinuidades, mas estas foram consideradas como aceitáveis por serem de tamanho inferior a 5 mm e não estarem agrupadas ou numa linha segundo a norma ISO 23277.5



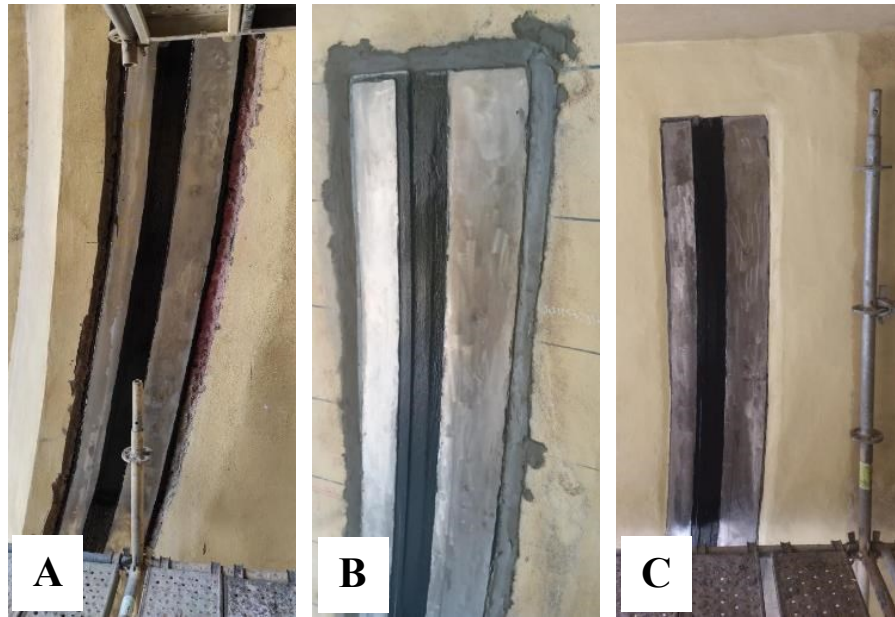
**Figura 28** – Ensaio por líquidos penetrantes: A – Aplicação de Líquidos Penetrantes; B – Descontinuidade observada; C – Detalhe da descontinuidade B

Depois da realização dos ensaios não destrutivos e das reparações feitas onde necessário, foi realizada a proteção anticorrosiva das partes metálicas de acordo com a especificação técnica interna (Gomes, CHB-230-ET-0011 - Technical Specification - Painting Application, 2021). O procedimento começou por uma decapagem para limpeza e preparação de superfície, garantindo o nível correto de rugosidade. Depois de garantir que as condições atmosféricas estavam de acordo com o especificado pelo fabricante, seguiu-se a aplicação de primário (Figura 29).



**Figura 29** – Proteção anticorrosiva: A – decapagem do aço ao carbono; B – primário aplicado na zona circundante do aço inoxidável

Considerando os tempos corretos entre demãos foi feita a aplicação da pintura (Figura 30 – A), realizou-se o enchimento do betão de maneira a este não causar interferências com a comporta em movimento (Figura 30 – B) e finalizou-se com pintura do mesmo de acordo com a especificação técnica (Gomes, CHB-230-ET-0012 - Technical Specification – Concrete Repair, 2021) (Figura 30 – C).



**Figura 30** – A – Pintura anticorrosiva do aço ao carbono; B – Aplicação do betão; C – Pintura do betão

O enchimento e pintura do betão também foram feitos respeitando as indicações do fabricante relativamente às condições atmosféricas, espessura de camadas intermédias e tempos de espera entre secagem de camadas e entre demãos de pintura.

#### 4.4 *Melhorias nas Máquinas de Fresar*

As melhorias seguintes, embora possam parecer problemas menores, tiveram uma grande influência no andamento da obra.

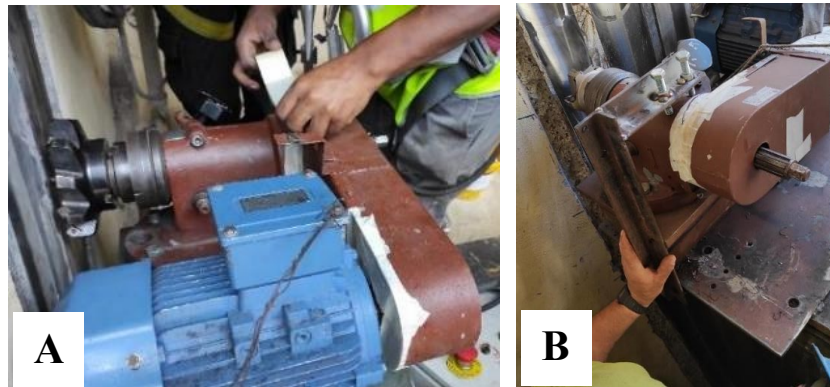
- Proteção das correias de transmissão

Durante o processo de maquinagem, observou-se a entrada de aparas para o conjunto da transmissão, o que originou diversos cortes nas correias de transmissão, que provocaram a fratura das mesmas e consequentes tempos de paragem. Foi por isso necessário tapar as aberturas da proteção da correia com fita adesiva, sendo que após este procedimento, não se voltaram a observar danos nas correias (Figura 31 – A).

- Vibrações excessivas na máquina durante o corte

Durante as operações de corte, observou-se uma grande vibração da máquina 1. Verificou-se que estas vibrações se deviam ao corpo da fresa não ter um apoio e a solidez necessária para evitar vibrações excessivas. Foi por isso necessário fabricar um suporte com uma cantoneira

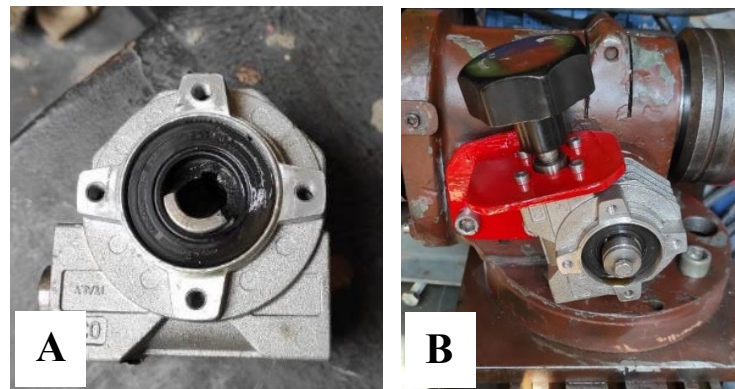
em aço na zona da fresa tendo-se conseguido reduzir as vibrações e melhorar o desempenho da máquina (Figura 31 – B).



**Figura 31** – Máquina de corte 1: A – Proteção da correia; B – Aplicação do suporte anti vibrações

- Redutores partidos

Durante a operação observou-se que o redutor da máquina de corte fraturava repetidamente na mesma localização. Verificou-se que a chaveta plana tinha um defeito que causava essas fraturas. Procedeu-se a essa substituição ao mesmo tempo que se fabricou um novo suporte mais robusto (Figura 32).

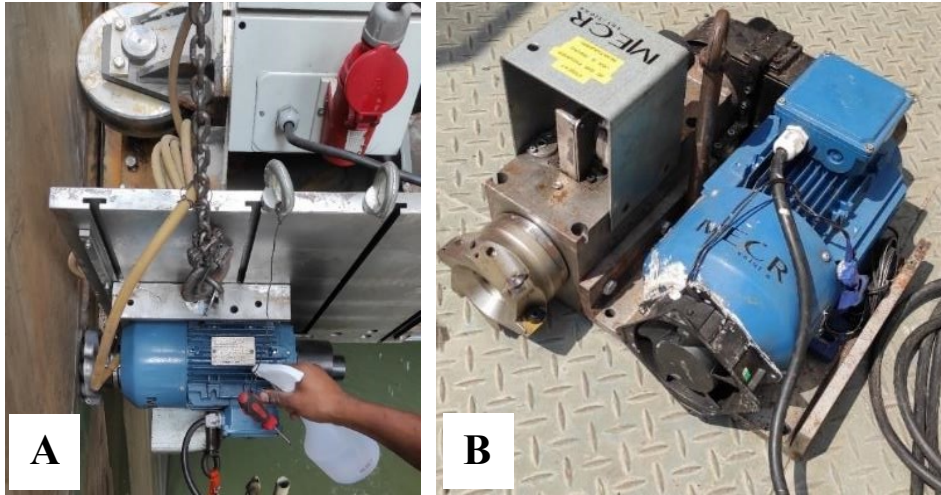


**Figura 32** – Máquina 1: A – redutor partido; B – novo suporte

- Sobreaquecimento do motor da máquina 2

Para proceder à maquinagem do aço martensítico, foi necessário ajustar os parâmetros de corte para uma velocidade de rotação muito reduzida, tendo-se observado que nestas condições o motor sobreaquecia de tal forma que perdia binário.

De modo a baixar a temperatura, inicialmente procedeu-se direcionando ar comprimido ao motor enquanto se aprovisionava um ventilador adequado (Figura 33).



**Figura 33** – Sobreaquecimento máquina 2: A – Uso de ar comprimido e borrifador de água; B – Instalação de ventilador

## 5 Outros trabalhos realizados

### 5.1 Controlo e recuperação das estanquidades

As estanquidades laterais funcionam instaladas com a borracha revestida de PTFE em contacto com a parede da conduta com uma pré compressão de 3mm de ambos os lados de modo a garantir uma vedação eficaz.

Depois de retirados os conjuntos das estanquidades laterais, estes foram inspecionados e intervencionados. A Figura 34 apresenta o estado de degradação da cantoneira das estanquidades antes da intervenção.

#### 5.1.1 Inspeção

##### **Barras de aperto e proteção anticorrosiva**

Observou-se que a proteção anticorrosiva das partes metálicas se encontrava, de uma forma genérica, em muito más condições, apresentando riscos e sulcos nas barras de aperto da estanquidade que resultaram na completa remoção da tinta (Figura 34). Estes danos resultaram do movimento da comporta e do atrito das barras de aperto sobre as peças fixas, que não devem entrar em contacto. As peças fixas exibiam também alguns riscos resultantes do atrito entre as peças.



Figura 34 – Barra de aperto: riscos, sulcos e remoção da proteção anticorrosiva

##### **Estanquidades**

De uma forma geral e em todo o seu comprimento, ambas as estanquidades apresentavam riscos e uma deformação permanente no seu bolbo, resultante de uma compressão excessiva ao longo do movimento de abertura da comporta ou de uma pré compressão excessiva. De

notar que a dimensão inicial (diâmetro) do bolbo era de 45 mm, sendo que nas medições realizadas se obtiveram valores em torno de 43 mm, como se observa na Figura 35



**Figura 35** – Medição da dimensão do bolbo, para comparação com o valor de projeto, observando-se valor inferior ao expectável resultado de deformação permanente da estanquidade da margem esquerda DC01 – 43mm

Observou-se que na margem direita a compressão do bolbo é maior (Figura 36). Esta diferença na compressão é um indício de um desvio da comporta para essa margem ou de uma deformação maior das peças fixas nessa margem.



**Figura 36** – Medição da dimensão do bolbo da estanquidade da margem direita do DC01, observando-se uma deformação permanente do bolbo maior que na estanquidade da margem oposta – 42.5mm

### 5.1.2 *Processo de Recuperação*

O processo de recuperação das estanquidades envolveu a substituição das borrachas por umas novas, decapagem e nova aplicação de proteção anticorrosiva das barras de suporte e de aperto (Figura 37).



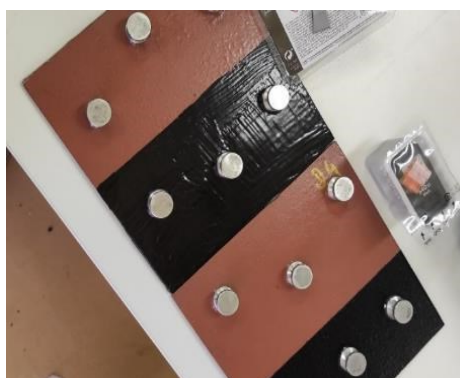
**Figura 37** – A – Decapagem por jato abrasivo; B – Aplicação da proteção anticorrosiva

Como método de validação da aplicação da proteção anticorrosiva foram feitos ensaios de aderência de acordo com a norma ISO 4624.

O ensaio de aderência por pull off, de acordo com a norma ISO 4624, é um método utilizado para determinar a resistência de aderência de revestimentos aplicados em superfícies. É um método destrutivo e, como tal, foi feito numa chapa de aço semelhante à do material base (Figura 38).

A norma estabelece as condições de preparação da superfície, a maneira de realizar o ensaio, os requisitos do dispositivo de aderência e os procedimentos para a avaliação dos resultados. Esses padrões garantem a uniformidade e a precisão do ensaio, permitindo que os resultados sejam comparáveis e confiáveis.

O procedimento consiste em fixar com uma cola um dispositivo de teste à superfície com proteção anticorrosiva (Figura 38) e, após dar o tempo de secagem necessário, aplicar uma força de tração gradualmente crescente até que ocorra a separação do dispositivo de teste. A força necessária para que essa separação aconteça é registrada em unidades de pressão.



**Figura 38** – Ensaio de aderência por tração PULL-OFF observando-se os diversos dispositivos de teste colados às superfícies de teste com pintura anticorrosiva

No presente caso, foram feitos 6 ensaios por comporta, 3 na camada de primário e 3 com a aplicação completa da pintura (Figura 39). Os resultados dos ensaios obtidos foram todos dados como aceitável por estarem acima dos 4 MPa definidos na norma.

Resultados Obtidos (Results)											Aceitação (Acceptance)	
Ensaio nº (Test nº)	Valor MPa (Value)	A	A/B	B	B/C	C	C/Y		Y	Y/Z	OK	NOK
1	7,50						100%				X	
2	7,00						100%				X	
3	7,00						100%				X	
4	7,00						100%				X	
5	7,50						100%				X	
6	7,00						100%				X	

**Figura 39** – Resultados do ensaio de aderência por tração PULL-OFF – valor mínimo de aceitação 4MPa

Foi também feita a medição de espessuras do revestimento de acordo com a norma ISO 2178, utilizando-se para o efeito o aparelho *SAUTER TG 1250-0.1FN*.

Este ensaio envolve a colocação de uma sonda sobre a superfície revestida, a qual emite um campo eletromagnético de alta frequência, que atinge o material base condutor, induzindo correntes elétricas parasitas (ou correntes Eddy). O equipamento mede a resistência das correntes Eddy geradas pelo campo eletromagnético, sendo que essa resistência é proporcional à espessura do revestimento, a qual é calculada e exibida no visor.

Antes de realizar as medições, o aparelho deve ser calibrado adequadamente para garantir a precisão dos resultados. O procedimento de calibração varia dependendo do tipo de revestimento e do material base em questão. A norma ISO 2178 define as condições de calibração do aparelho de medição, os métodos de medição, os requisitos para a realização do ensaio e os valores aceitáveis de espessura do revestimento, conforme aplicável para cada caso específico. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria, para garantir que os revestimentos estejam dentro das especificações exigidas e atendam aos padrões de qualidade e segurança. A medição adequada da espessura do revestimento é essencial para assegurar a proteção contra a corrosão e outros danos, bem como para garantir a eficiência e o desempenho adequado do produto revestido.

Todas as superfícies pintadas foram ensaiadas pela outra empresa do consórcio e resultaram em espessuras de revestimento de acordo com os requisitos do cliente. Na figura abaixo (Figura 40) retirada do relatório de inspeção Nr.8 (Carlos, 2022) está representada a tabela de resultados de um dos relatórios onde se pode verificar o valor de referência para cada demão, os valores mínimo e máximo medidos e o valor médio de todos os pontos recolhidos. Estes

valores são apresentados em micrómetros e foram medidos em áreas representativas como áreas planas, cantos e zonas com possíveis variações de espessura.

**Coat Thickness (Paint)**

Humida/Wet Seca/Dry	Total Total Coat	1ª Demão 1st Coat	2ª Demão 2nd Coat	3ª Demão 3rd Coat	4ª Demão 4th Coat
Valor Reference value	<b>500</b>	<b>50</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	
Espessura Mínima Min. Thickness		41,5	207,4	461,5	
Espessura Máxima Max. Thickness		73,2	328,6	732,4	
Espessura média Average thickness		55,1	285,3	529,8	

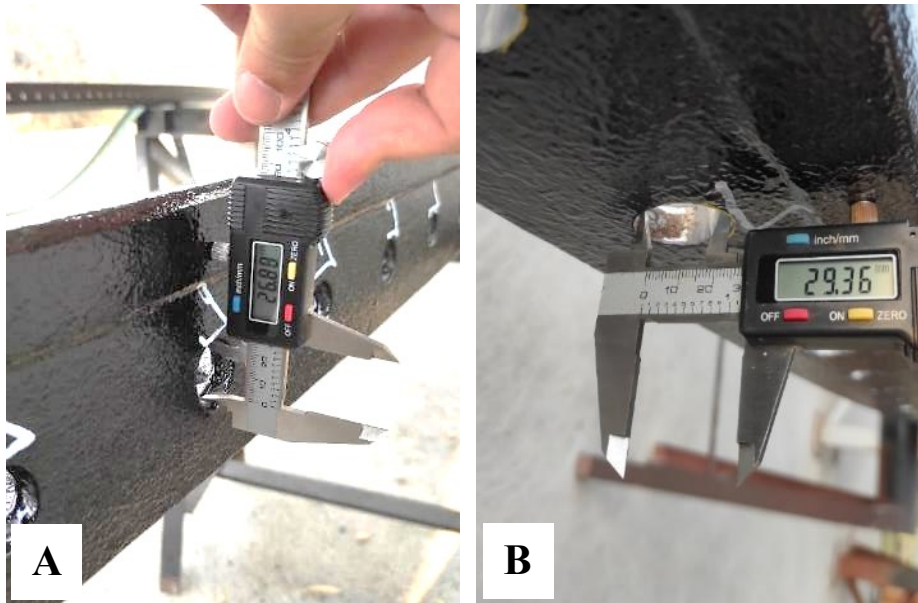
**Figura 40** – Resultados do ensaio de medição de espessuras

No reaperto do conjunto foram usadas anilhas de plástico (tipo DUBO) (Figura 41) para evitar o contacto entre diferentes metais e, conseqüentemente, corrosão galvânica.



**Figura 41** – Anilhas de plástico tipo DUBO colocadas para evitar o contacto entre metais

Durante o processo de reparação foi também feita uma alteração de melhoria. Para permitir uma afinação maior, os furos de fixação e regulação lateral da barra foram ovalizados de modo a permitir aumentar o ajuste lateral das estanquidades quando estas já estão montadas na comporta. Na Figura 42 observa-se o resultado desta operação. Antes da ovalização o furo apresentava um diâmetro cerca de 27 mm e este passou a diâmetros acima de 29 mm



**Figura 42** – Ovalização dos furos de regulação lateral; A – antes com 27mm; B – depois com 29mm

## 5.2 *Inspeção e reparação das peças fixas*

### 5.2.1 *Reparação de fissura na blindagem DCI ME*

Durante a remoção das estanquidades e inspeção das peças fixas laterais, verificou-se a existência de uma fissura na peça fixa. Como se tratava de uma fissura na blindagem de aço inoxidável 17-4 e no caminho onde passa a estanquidade, foi especialmente importante proceder à sua reparação.

O problema foi reportado ao cliente e reparado posteriormente.



**Figura 43** – Fissura na peça fixa

Esta fissura nas peças fixas situa-se na zona da travessa frontal e pensou-se estar relacionada com o diferente movimento entre as paredes e a travessa frontal devido às reações químicas no betão.

As imagens seguintes (Figura 44 e Figura 45) apresentam uma vista geral da blindagem, a localização da fissura perto da travessa frontal e um detalhe da mesma.



**Figura 44** – Fissura DC1 – localização da fissura na zona de passagem de água e no plano de escorregamento da estanquidade

A fissura foi motivada pelo movimento diferencial entre a zona rígida (zona da travessa frontal) e a zona mais deformável (blindagem abaixo da travessa frontal)



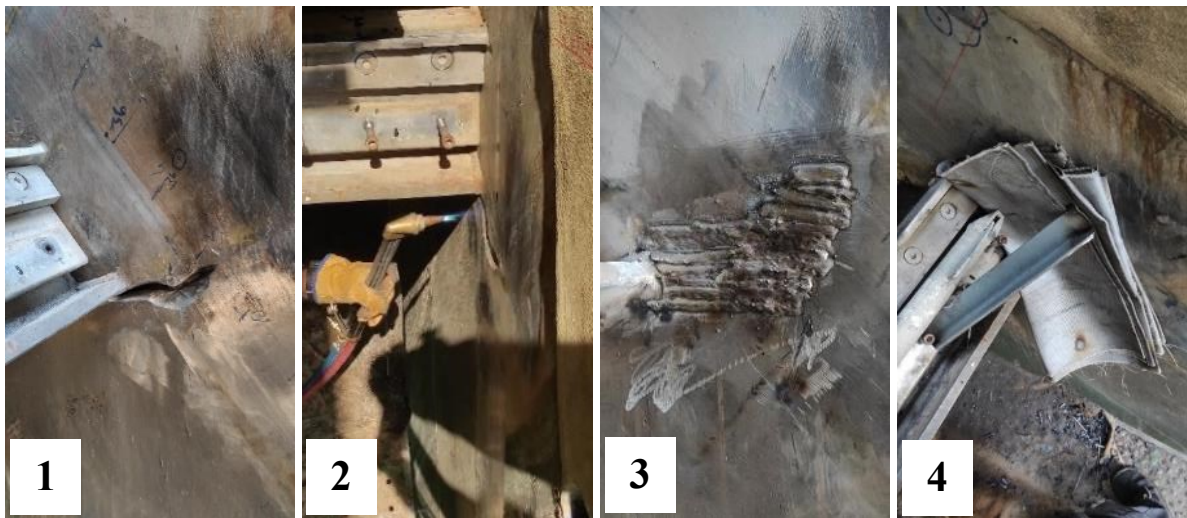
**Figura 45** – Fissura DC1 – detalhe da fissura com cerca de 11cm de comprimento a começar na soldadura da travessa frontal com a peça fixa lateral

Após consulta com um engenheiro soldador, foi elaborado um procedimento de reparação com os materiais existentes em obra, o qual foi autorizado por parte do cliente.

O procedimento consistiu em:

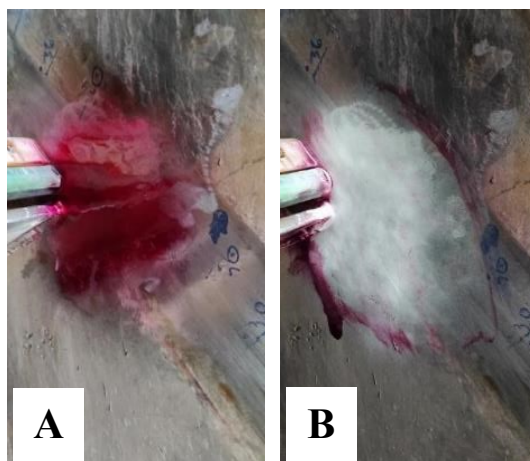
- Executaram-se dois furos no início e fim da fenda como forma de relaxamento de tensões.

- A fissura foi aberta e limpa de forma a melhorar as condições de soldadura (Figura 46 – 1 preparação).
- Todo o processo de soldadura foi feito com controlo da temperatura com o uso de um termopar, mantendo-se a temperatura elevada, entre passagens, com um maçarico de gás (Figura 46 – 2 pré-aquecimento).
- Enchimento total da fissura (Figura 46 – 3 enchimento).
- No final da soldadura assegurou-se o arrefecimento lento com uma manta térmica (Figura 46 – 4 arrefecimento).



**Figura 46** – Reparação da fissura nas peças fixas DC1; 1-preparação; 2- pré-aquecimento; 3- enchimento; 4- arrefecimento com manta térmica

Depois de executada a soldadura e feito o arrefecimento lento, foi efetuada a regularização da superfície com uma rebarbadora e uma régua de alumínio. Por fim foi realizado um ensaio por líquidos penetrantes (Figura 47), tal como descrito no capítulo 4.3.



**Figura 47** – Fissura DC1 – Ensaio de Líquidos Penetrantes após reparação da fissura

### 5.2.2 *Reparação de soldaduras*

Com o desenvolvimento dos trabalhos de maquinagem foram detetados alguns problemas nas uniões soldadas entre as peças fixas. Em quase todas as soldaduras as fissuras desenvolviam-se em toda a espessura das peças. Registou-se um caso onde se observou uma fissura antes de se proceder a qualquer maquinagem. Em todos os casos foi feita a recuperação das soldaduras. Na figura seguinte mostra-se uma fissura observada entre a blindagem de aço martensítico e o aço carbono na zona de transição.



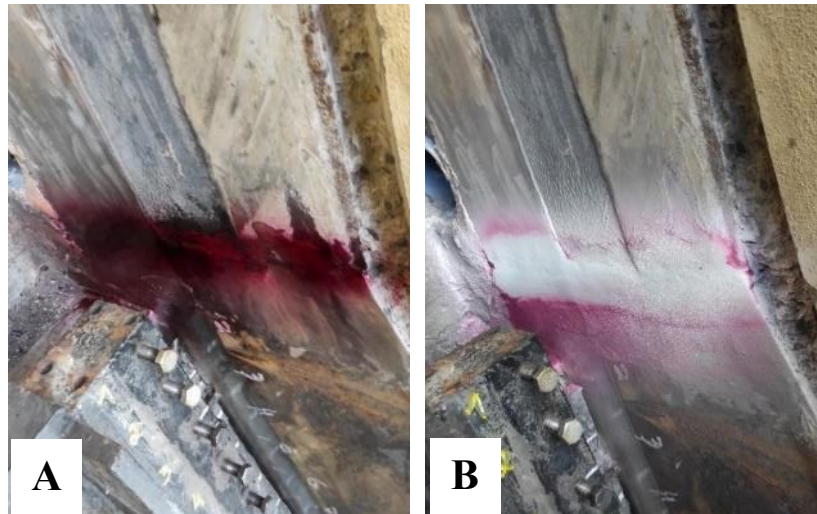
**Figura 48** – Fissura observada nas peças fixas entre a parte inferior do aço carbono com a parte do aço martensítico

A reparação das soldaduras foi feita de acordo com o material base existente. Para as uniões do aço carbono com o aço martensítico (Figura 49) foram usados elérodos revestidos E309 MOL conduzindo a uniões soldada com boa ductilidade e permitindo algum movimento entre as diferentes partes que possa haver devido às expansões do betão antes de surgir uma nova fissura. Para as uniões carbono/carbono foram usados elérodos revestidos 7018, o que permitiu obter ligações com características mecânicas semelhantes às do material base.



**Figura 49** – Reparação de fissura – soldadura com elérodos revestidos E309 MOL

Em todos os casos foram realizadas inspeções com líquidos penetrantes como descrito no capítulo 4.3 (Figura 50) e foi feita a reparação de defeitos quando estas eram detetadas.



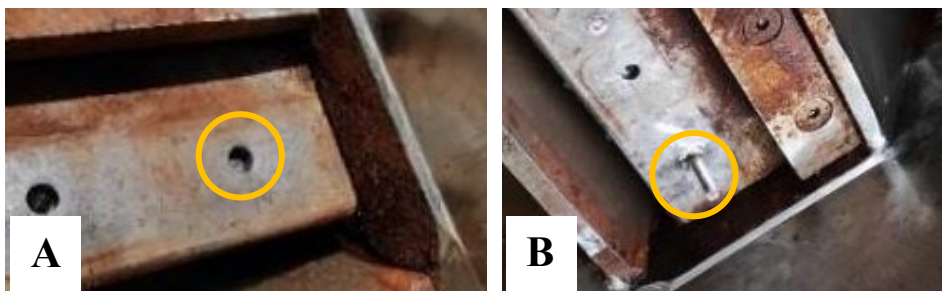
**Figura 50** –Inspeção da zona soldada: A – aplicação de líquidos penetrantes; B – Aplicação de revelador

### 5.3 Parafusos e furos com roscas degradadas

Durante a desmontagem e montagem de estanquidades, verificou-se que alguns parafusos já não estavam em condições de ser reutilizados. Uns já não davam o aperto necessário, um partiu-se e um era inexistente.

#### **Fraturas em Parafusos**

Durante o processo de montagem da estanquidade inferior, um parafuso partiu ao ser apertado (Figura 51 – A). Após várias tentativas de retirar o parafuso partido foi decidido soldar nessa zona um perno roscado (Figura 51 – B). Assim foi possível efetuar a montagem da régua de aperto com uma porca



**Figura 51** – A – Parafuso partido; B – Perno roscado soldado

#### **Furos roscados com a rosca degradada**

Depois de se fazer a limpeza e durante a montagem das estanquidades, observou-se que alguns furos M16 na comporta apresentavam a rosca degradada, não permitindo o aperto necessário. A sua reparação de modo a funcionar de novo como um parafuso M16 era muito pouco prática.

Como tal, e após análise, chegou-se à conclusão de que não havia inconvenientes na alteração dos furos e parafusos para o tamanho M20.

A solução passou por alargar o furo e fazer uma nova rosca de tamanho superior, M20. Apesar desta situação não ter sido prevista no planeamento, existiam em obra um conjunto de machos M20 e parafusos correspondentes que tinham sido aprovionados com outra finalidade.

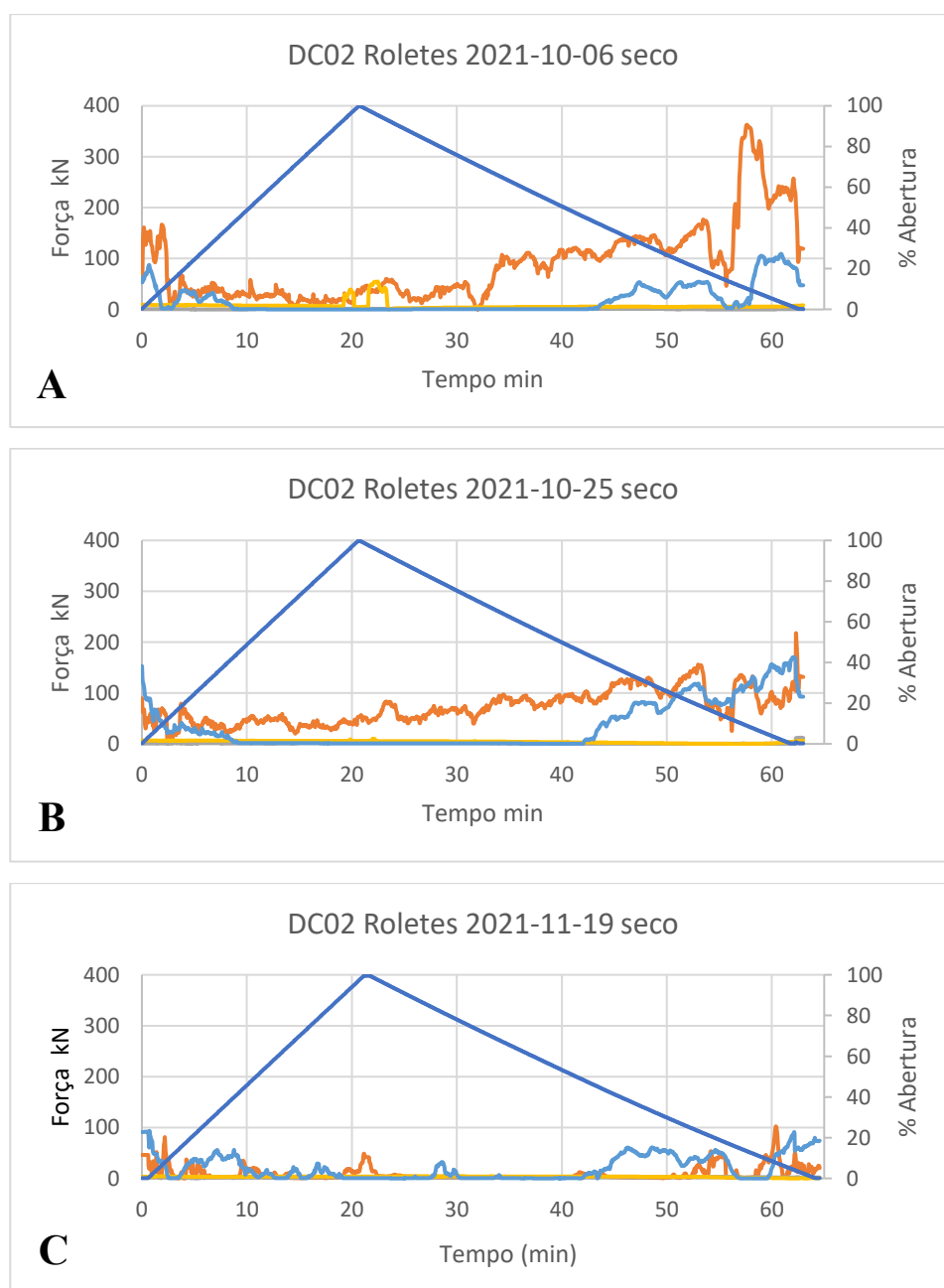
Nas estanquidades as furações foram alargadas para 22 mm, sem inconvenientes funcionais. O conjunto das estanquidades foi então montado em boas condições.



## 6 Resultados e Conclusões

Após a conclusão dos trabalhos de recuperação das peças fixas e reajuste da posição das comportas, o sistema foi novamente monitorizado para avaliar os esforços presentes nos roletes, braços e munhões. Os gráficos obtidos podem ser observados na Figura 52.

Analisando os gráficos e os trabalhos realizados, pode-se concluir que os objetivos básicos da intervenção foram alcançados.



**Figura 52** – Sistema de controlo – Esforços nos roletes ao longo da abertura e fecho da comporta registados em 3 alturas da intervenção: A – no princípio; B – durante; C – no final

Após a conclusão da intervenção nas comportas da barragem, verificou-se:

- Uma melhoria geral das condições de funcionamento das comportas;
- Os esforços nos servomotores tornaram-se mais contínuos e suaves;
- Foram reduzidas as vibrações associadas ao movimento das comportas que, em vários casos, eram muito significativas;
- Obteve-se uma diminuição significativa dos esforços dos roletes nas peças fixas nas várias comportas intervencionadas como se pode ver nos gráficos. No caso apresentado do DC02, o rolete superior esquerdo diminuiu os esforços de cerca de 350 kN para valores na ordem de 100 kN;
- Obteve-se uma melhoria significativa da estanquidade na situação de comporta fechada – antes da intervenção eram visíveis fugas significativas em todas as comportas onde se fez a intervenção e no final conseguiu-se eliminar todas essas fugas.

Os meios previstos – a constituição da equipa, a metodologia de trabalhos (com as afinações necessárias face às dificuldades encontradas), os procedimentos de trabalho e as máquinas utilizadas - foram os necessários para a execução com sucesso do trabalho.

Por último, no que toca à duração, foi cumprido o planeamento inicial e os trabalhos foram terminados no prazo previsto (descontando as interrupções motivadas pela pandemia).

Assim, esta intervenção, que foge claramente da habitual intervenção de manutenção em comportas, pode ser considerada um sucesso.

## 7 Referências

- Almeida, A. B. (1999). *Dam Risk Management At Downstream Valleys*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Carlos, P. (2022). *Relatório N.5 de Inspeção e Ensaio de Proteção Anticorrosiva*. Empreiteiro.
- Cezar, P., & Erbisti, F. (2002). *Comportas Hidraulicas*. Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- Cliente. (2022). *Relatório e Contas 2022*. Moçambique: Cliente.
- Curtis, D. D. (2000). *A REVIEW AND ANALYSIS OF AAR-EFFECTS IN ARCH DAMS*. Niagara Falls: Acres International.
- Gomes, L. (2020). *CHB-230-ET-0005 - Risk Analysis - Spillway Gate Modifications*. Lisboa: Empresa.
- Gomes, L. (2021). *CHB-230-ET-0011 - Technical Specification - Painting Application*. Lisboa: Empresa.
- Gomes, L. (2021). *CHB-230-ET-0012 - Technical Specification – Concrete Repair*. Lisboa: Empresa.
- Santos, M. B., & Brito, J. d. (Setembro de 2008). O panorama nacional das reacções álcalis-silica em betões. *Revista de Engenharia Civil Numero 32 - Universidade do Minho*, pp. 57-71.
- SOREFAME. (1972). *Desenhos Técnicos, Processo 44840, Obra 20445*. Amadora: SOREFAME.
- ISO 16809:2017 – Non-destructive testing — Ultrasonic thickness measurement
- DIN 19704-1:2014 – Hydraulic steel structures - Part 1: Criteria for design and calculation
- ISO 16859-1:2015 – Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method
- ISO 3452:2021 – Non-destructive testing — Penetrant testing
- ISO 23277:2015 – Non-destructive testing of welds — Penetrant testing — Acceptance levels
- ISO 4624:2016 – Paints and varnishes — Pull-off test for adhesion.

ISO 2178:2016 – Non-magnetic coatings on magnetic substrates — Measurement of coating thickness — Magnetic method