CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.257
ISBN 978-65-86819-05-2

REABILITAÇÃO DE LEVADAS NA ILHA DA MADEIRA, PORTUGAL

MONTEIRO, FERNANDO CARLOS BANDARRINHA
Doutorando em Engª Civil
Universidade Estadual de Campinas - FEC
São Paulo, Brasil
fcarlos_monteiro@hotmail.com

MACHADO, PAULO PALMEIRA
Doutorando em Engª Civil
Universidade Estadual de Campinas - FEC
São Paulo, Brasil
paulop.machado@yahoo.com.br

VARUM, HUMBERTO
Doutor em Engª Civil
Universidade do Porto - FEUP
Porto, Portugal
hvarum@fe.up.pt

ALMEIDA, LUÍS CARLOS
Doutor em Engª Civil
Universidade Estadual de Campinas - FEC
São Paulo, Brasil
almeida@fec.unicamp.br

RESUMO

As LEVADAS, são canais de transporte e de irrigação de água, constituídas de concreto armado de médias a grandes dimensões. O início da sua construção, confunde-se com a história do povoamento, em particular desde os primeiros tempos de colonização, no século XV. As Levadas na Ilha da Madeira são um património histórico e cultural de extraordinária importância, não só pelo transporte de água para fins de rega, como para consumo humano e ainda para produção de energia, proveniente de regiões com elevado índice de pluviosidade (zona norte), para outras zonas com total escassez (zona sul da ilha). Além disso, é um indiscutível fator dinamizador de turismo e que proporciona importantes receitas na economia da Ilha da Madeira, pelos passeios ecológicos de extrema beleza. Este estudo, focaliza o projeto de reabilitação de Levadas e a respetiva construção, através da recuperação de uma Levada em particular, Levada do Norte, cuja extensão perfaz 15 km e duração de obra de cerca de 3 anos. O presente artigo possui 2 objetivos, são eles: a) descrever e comentar o projeto e a execução da reabilitação de Levadas na Ilha da Madeira, salientando dificuldades, riscos e a utilização de inovações tecnológicas; b) analisar possíveis alterações de projeto, de forma a evitar patologias usuais, melhorar o desempenho, durabilidade e segurança das estruturas. As conclusões finais indicam que o projeto e a execução da obra são de excelente qualidade, adaptando-se ao meio sem perturbações no ecossistema, contudo, são sugeridas algumas mudanças pontuais de projeto de modo a torná-lo ainda melhor, sendo exemplo: a adoção de juntas de dilatação a cada 76,5 m por efeitos térmicos; o aumento da área de aço para combater os efeitos de retração (para 2,53 cm^2/m); entre outras propostas de melhorias, relacionadas com os aspetos construtivos.

Palavras-chave: Levadas; concreto armado; projeto de reabilitação; recuperação; juntas de dilatação.

ABSTRACT

The LEVADAS are water transport and irrigation channels, made of medium to large reinforced concrete. The beginning of water channels constructions is mixed with settlement history, particularly since the early days of colonization in the 15th century. The water channels on Ilha da Madeira are a historical and cultural heritage of extraordinary importance, not only for transporting the water to irrigation purposes, but for human consumption and energy production, from regions with heavy rainfall (north area) to other regions with lower rainfall. Also, it is an important factor for tourism that provides important income Ilha da Madeira, due to ecological tours of extreme beauty. This paper focuses on the rehabilitation project of water channels and its construction, through the recovery of a water channel, Levada do Norte, which has more than 15 km of length and had a duration of 3 years of construction. This study has 2 objectives: a) to describe and comment the project and execution of a water channel in Ilha da Madeira highlighting difficulties, risks and the use of technological innovations b) analyze possible design changes, avoiding usual pathologies, thus improving the performance, durability and safety of structures. The final conclusions indicate that the project and the execution were excellent, and were adapted to the environment without disturbing the ecosystem, however some changes are suggested in the project, in order to become even better, such as: the adoption of expansion joints every 76.5 m due to thermal effects; an increase in the reinforcement area (2.53 cm2 / m) to resist to the shrinkage effects; and other improvements, related to construction aspects.

Keywords: Water channels; reinforced concrete; rehabilitation project; repair; expansion joints

ISBN 978-65-86819-05-2

1. INTRODUÇÃO

A pequena ilha da Madeira, guarda um património histórico e cultural soberbo, no que se refere ao aproveitamento sustentável dos seus recursos naturais disponíveis. Segundo Quintal (2006), as primeiras levadas surgem desde os primeiros tempos de colonização, no século XV, pela estrita necessidade de transferência de água de zonas abundantes (zona norte), para zonas de elevada escassez (zona sul). Lamas (1956), foi mais longe ao proferir:

> "*… para este povo, o problema das levadas é a própria vida. Sem água, as terras permanecerão maninhas. Pela água o madeirense tornou-se gigante a medir forças com outro gigante: a montanha. Pela água foi capaz de arrancar à sua mediana estatura energias sobre-humanas e suprir o que a natureza não lhe proporcionou. Pela água desafiou a morte e, muitas vezes, foi vencido*".

As íngremes escadarias de poios (socalcos) e as levadas, expressam a beleza patrimonial erguida por um povo que desde a primeira metade do século XV, trava uma luta acirrada com as rochas vulcânicas em busca de solo e água, promovendo com sabedoria uma intervenção humana sem criar ruturas no funcionamento dos ecossistemas. Para edificar os pequenos tabuleiros de solos aráveis, foi necessário partir o basalto e desmantelar os tufos vulcânicos, exigindo a construção de muros sem fim, com a rotina de pedra sobre pedra. O solo transportado às costas por íngremes caminhos pedonais, deram vida aos férteis tabuleiros, fruto de alimento há quase 6 séculos. Através de sucessivas gerações foram sendo criadas espetaculares paisagens humanizadas, dignas de admiração e respeito dos turistas. O papel dinamizador das levadas, foi muito além da sustentabilidade da agricultura regional, proporcionando ainda harmonia e beleza indescritível nas paisagens que percorre ao longo da floresta indígena (Laurissilva), classificada pela UNESCO, como património natural da Humanidade. Tal facto, abriu um importante e sustentável nicho de mercado, o Turismo de Pedestrianismo, importante receita na economia regional da Madeira. A paisagem indiscritível, o clima, a flora, a preservação da floresta indígena, a integração harmoniosa dos elementos edificados nos sistemas naturais e a excelente organização dos serviços de turismo, são os principais atributos de sucesso deste nicho de mercado (amantes da natureza, sem idade especifica), que premeia o turismo o ano inteiro e floresce de ano para ano.

Quintal (2006), refere que as primeiras Levadas além de pouco extensas, eram escavados na rocha e contavam com o auxílio de grossas tábuas em forma de calha. Com o aumento do plantio de canaviais e de vinhas, as necessidades de irrigação aumentaram, estimulando assim o crescimento da construção de Levadas com técnicas mais duradouras. Assim, as primitivas calhas de madeira, foram sendo substituídas por canais construídos de alvenaria ou concreto ciclópico. Por outro lado, com a introdução de explosivos a abertura de túneis e galerias de captação de água, o acesso e o transporte de água, simplificou. O comprimento dos canais aumentou, assim como a seção transversal, passando nestes últimos 50 anos a ser construídas com alturas que oscilam entre 1,0 m a 1,20 m e largura ligeiramente superior a 1,0 m. A preferência por canais estreitos, deve-se á noção de perda de água por evaporação. Nas últimas décadas, a construção de novas Levadas passou a empregar o concreto armado e as reparações das existentes, dependendo da natureza das anomalias, o uso de argamassas de concreto com adição de fibras de polipropileno, ou o concreto armado. O perfil longitudinal das levadas é normalmente traçado com elevada precisão, apresentando um suave declive (1/1000) para permitir baixas velocidades de água. Tudo indica que a técnica usada na construção das primeiras Levadas, provém do Norte de Portugal de entre Douro e Minho, pela semelhança das existentes em regiões nortenhas do continente. Ainda segundo Quintal (2006), durante séculos as levadas foram sendo construídas exclusivamente com a força de homens valentes que utilizavam instrumentos rudimentares. Esses heroicos rocheiros, suspensos por cordas amarradas em troncos de árvores ou em cabeços de rocha, perfuravam as rochas até abrir a necessária concavidade para fazer passar a levada (Figura 1). Paralela á levada, geralmente acompanha uma vereda que ora se alarga ora se estreita, em total consonância com o relevo topográfico local.

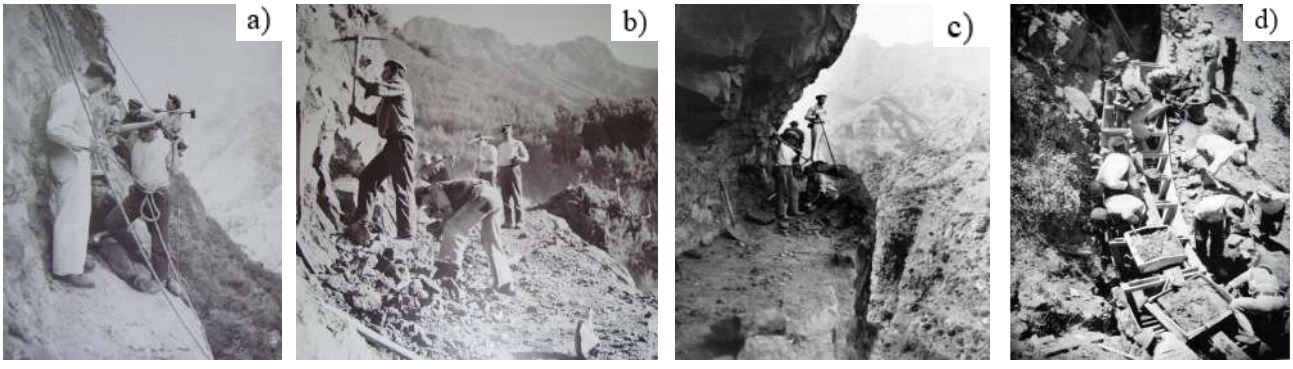


Figura 1: a) b) c) d) Trabalhos de abertura de Levadas no cume de montanhas locais. (VIERA, 2015)

ISBN 978-65-86819-05-2

Atualmente os trabalhos de abertura e conservação das Levadas são menos penosos, dada a utilização de equipamentos mais modernos, contudo a morte espreita na simples distração de quem trabalha em veredas á beira de abismos. Ainda hoje e ao longo de todo o ano, homens destemidos arriscam a vida para manter a água nos canais, persistindo a epopeia da água iniciada á quase 6 seculos e que ainda esta para durar (Figura 2).

Reza a história que as primeiras Levadas foram construídas por homens ricos, donos de nascentes e terras de cultivo. Contudo, ainda no século XV, surgem outras levadas particulares, construídas e conservadas por iniciativa de associações de agricultores (heréus). Até ao final do século XVIII, a irrigação das terras agrícolas no sul da Madeira, mantinha-se á custa de água de levadas que não atravessavam a cordilheira central. Entretanto, com a expansão da agricultura de regadio até cerca de 600 metros de altitude, gerou uma crescente falta de água e que obrigou á execução de novas captações nas vertentes voltadas a norte. No norte a água era abundante, mas transportá-la para as sedentas terras do sul era uma tarefa extremamente árdua (por implicar sérios problemas técnicos, para transpor a espinha dorsal montanhosa) e por outro exigia vultosos investimentos financeiros. Perante a incapacidade da iniciativa privada o estado viu-se obrigado a intervir, iniciando a construção de Levadas com dinheiros públicos na primeira metade do século XIX. A Levada Velha do Rabaçal foi a primeira a beneficiar dos dinheiros públicos (1835-1860), seguindo-se a Levada da Serra do Faial (1887-1905). A intervenção do Estado tornou-se bastante mais intensa em 1947 através da Comissão Administrativa dos Aproveitamentos Hidráulicos da Madeira, tendo iniciado um audacioso plano de construção de levadas. Devido á acidentada geografia e às características dos solos só cerca de 300 Km^2 se consideram áreas de plantio. Em 1947, a área irrigada não ultrapassava os 110 Km^2, o que era manifestamente baixa. Entretanto, num período de 20 anos, foram construídos cerca de 400 Km de canais e 209 Km^2 de terras passaram da agricultura de sequeiro para o regadio, ou seja, em 1967, quase toda a área agraria se encontrava irrigada e a rede de levadas tinha crescido de 1000 Km para 1400 Km (Vieira, 2015). Além disso, dado que as principais bacias hidrográficas do Norte se encontravam disponíveis acima dos 1000 m de altitude e as terras secas a irrigar na zona sul, se localizavam abaixo dos 600 m, foi ainda possível pensar em produção de energia, tendo sido construído 4 centrais hidroelétricas, que contribuem atualmente com cerca de 15% da energia elétrica consumida na Região.



Figura 2: a) b) c) Imagens de Levadas na ilha da Madeira, com diferentes panoramas (do autor)

O presente trabalho tem por base a reabilitação da "Levada do Norte", vivenciada por um dos autores durante cerca de 3 anos, cuja experiencia foi crucial, para os comentários que se seguem nos próximos itens relativos ao projeto, execução, bem como propostas de melhoria para ambas as fases. Os objetivos deste artigo são: a) descrever e comentar o projeto e a execução da reabilitação de levadas na Ilha da Madeira, salientando dificuldades, riscos e a utilização de inovações tecnológicas que permitiram o cumprimento dos prazos contratuais e a obtenção de rendimentos de trabalho até então inexistentes; b) analisar possíveis alterações de projeto, de forma a evitar patologias correntes, melhorar o desempenho, durabilidade e segurança das estruturas.

2. LEVADA DO NORTE (CASO DE ESTUDO)

A Levada do Norte foi construída entre 1947 e 1952. A sua origem fica localizada na Ribeira do Portal da Burra, nos cabeços da Ribeira do Seixal (costa norte), a 1000 metros de altitude com uma extensão total de cerca 60,5 km, sendo subdividida na Central da Serra de Água em Lanço Sul e Lanço Norte da Levada do Norte. Trata-se de uma das mais importantes levadas construídas na Ilha da Madeira, não tanto pelas características que lhe são peculiares superiores às das levadas mais antigas e modernas como, principalmente, pela arriscada, temerária e heroica construção do canal, rasgado a meia encosta de rochas escarpadas. Esta levada canaliza a água desde o extremo Norte até o extremo Sul da ilha, irrigando as freguesias da Serra de Água, Ribeira Brava, Campanário, Quinta Grande, Estreito e Câmara de Lobos.

ISBN 978-65-86819-05-2

2.1 Descrição do Projeto da Levada do Norte

O projeto de reabilitação da Levada do Norte – Lanço sul, compreendida entre a Ribeira da Ameixieira ao km 3.460, pertencente ao Concelho da Ribeira Brava e a Ribeira do Inferno ao Km 29.415, pertencente ao Concelho de Câmara de Lobos, teve por objeto a reabilitação de troços separados entre si, perfazendo um comprimento de cerca de 15 Km, numa extensão total de canal, de cerca de 26 Km. Este canal, apresenta-se na generalidade revestido com argamassa de cimento e areia assente sobre base de pedra partida, sendo significativo o volume de perdas de água por via da degradação acentuada do seu revestimento, ou ainda pelas más condições climatéricas que de tempos a tempos, despoletam fenómenos de deslizamento de terras, que destroem severamente a Levada. A finalidade desta obra consistiu, por um lado reduzir o volume de perdas e, consequentemente, melhorar as condições de transporte dos caudais circulantes e por outro lado reforçar estruturalmente o canal, conferindo maior segurança quer ao próprio canal, quer às demais infraestruturas e/ou habitações de apoio existentes ao longo da Levada. O prazo de execução da obra, previa 19 meses de calendário, com inicio a 15 de Outubro de 2008 e término a 15 de Maio de 2010, contado a partir da data de consignação, sendo que o caderno de encargos previa um período de paralisação dos trabalhos na levada, entre 15 de Maio de 2009 a 15 de Outubro de 2009, por motivos de necessidade de rega agrícola nesse período, designado de período do "Giro".

Os projetos correntes de obras de Levadas geralmente são bastante completos. Na presente obra, o projeto contemplava: o levantamento topográfico de toda a extensão do canal; a limpeza do canal, nos troços a intervir entre o Km 3.460 e o Km 29.415; a realização do projeto e execução de duas captações de água a construir nas imediações de duas ribeiras; o fornecimento e instalação de comportas frontais e laterais, em pontos estratégicos no traçado do canal; o fornecimento e instalação de estações hidrométricas, para medição do caudal que circula na levada; a recuperação de descarregadores de superfície e descargas de limpeza com rebaixo, a jusante das linhas de água; a recuperação de passagens hidráulicas existentes com lajes armadas, para garantir a passagem pedonal sobre o canal; a execução de canal novo em concreto armado, nos troços onde se verifica mau estado do canal e perdas expressivas; a recuperação parcial do canal em reboco com fibras polipropileno nos troços onde o estado de conservação é baixo; a instalação de lajetas pré-fabricadas, plataforma em gradil e guardas de segurança na passagem pedonal; a recuperação de duas Casas de Abrigo existente, junto ao canal, em elevado estado de degradação; a recuperação total do canal em concreto armado, onde se verifica mau estado e perdas excessivas de água no canal; recuperação de caixas divisórias de água, aonde se processa o controlo dos caudais circulantes e a repartição de água para as diversas regadeiras locais, que abastecem os campos de cultivo; recuperação de levada secundária, entre a caixa de captação e a caixa divisória da Ribeira Funda.

Para a recuperação da seção do canal, foram caraterizados 3 tipos de intervenção, sendo estes resumidamente:

- **Recuperação parcial do canal**, que consiste na aplicação de emboço e reboco de argamassa de cimento Portland e areia ao traço 1:6, com mistura de microfibras de polipropileno para prevenção da retração, com espessuras médias de 3 cm;
- **Execução integral de um canal sobre o existente**, com espessuras de parede e canal de 0,08 m em concreto simples do tipo C20/25 e malha simples eletrosoldada do tipo CQ30. O canal existente servirá de forma exterior;
- **Reparação total do canal**, que consiste em executar paredes e lajes de fundo com espessuras de 0,08 m, em concreto simples do tipo C20/25 e malha simples eletrosoldada do tipo CQ30, após demolição do canal existente.

Dos 3 tipos de recuperação de canal, resultaram **12 Secções Tipo**, distribuídas por troços ao longo do canal, troços estes denominados de **ST1 a ST12** e cujas dimensões se aproximam das apresentadas na Figura 3.

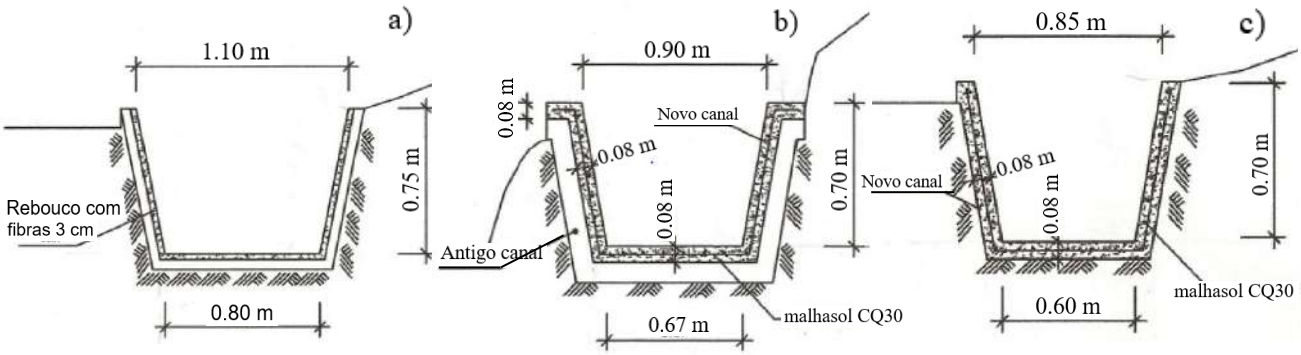


Figura 3: a) perfil da recuperação parcial de canal; b) perfil da execução integral de um canal sobre o existente; c) perfil da reparação total do canal, (do projeto).

ISBN 978-65-86819-05-2

As figuras 4 a 8, expressam alguns dos trabalhos mais relevantes, previstos em projeto e realizados em obra.



Figura 4: a) b) c) Captação (projeto e construção) da Ribeira da Varanda (do autor)



Figura 5: a) b) c) Comportas frontais e laterais, instaladas em pontos estratégicos no traçado do canal (do autor)

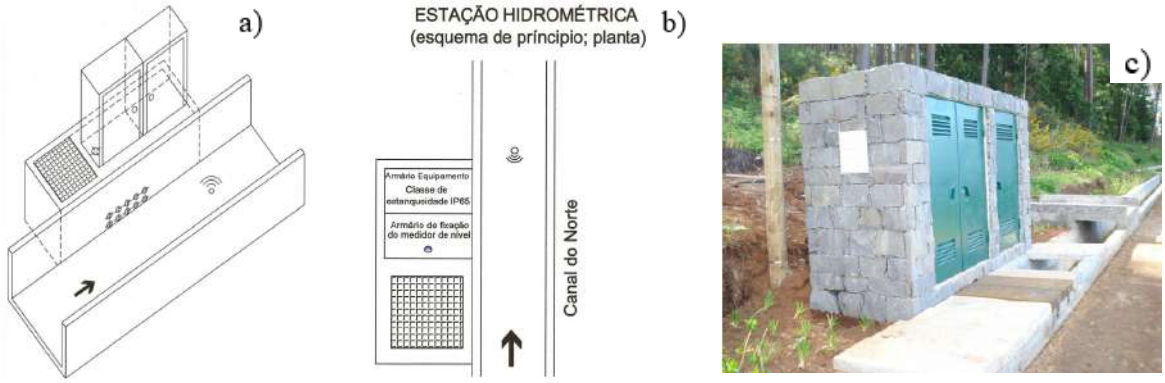


Figura 6: a) b) c) Estações hidrométricas (projeto e construção), para medição do caudal circulante na Levada (do autor)



Figura 7: a) Recuperação de passagem hidráulica; b) c) Recuperação da caixa divisória de águas (do autor)

ISBN 978-65-86819-05-2



Figura 8: a) Recuperação parcial do canal; b) Reparação Total do canal; c) Execução integral do canal (do autor)

De salientar ainda que o projeto previa a utilização de concretos, cuja resistência caraterística mínima á compressão, seja de fck,cyl = 20 N/mm^2 (classe C20/25). Em função da classe preconizada, as dosagens dos compostos cimentícios, foram retiradas da tabela prática da AICCOPN (registo nº 672/88), por se tratar de um órgão de elevada credibilidade no setor da construção civil, aceite tanto pelos órgãos públicos quanto privados (Tabela 1). Em termos de consistência do concreto, o projeto propõe a classe S3, isto é, abaixamento na ordem dos 100 mm a 150 mm (tendo sido verificado em obra). O tipo de cimento Portland utilizado foi CEM II/A, adequado para a classe de exposição ambiental XC3, cobrimento nominal mínimo de 35 mm, dosagem mínima de cimento 280 Kg/m^3 e razão água/cimento máxima 0,60. Em razão da exposição ambiental e da suave declividade do canal (1/1000), que conduz baixas velocidades de água e consequentemente reduzida abrasão das superfícies, o projeto previa espessuras de parede e soleira de 0.08 m.

Tabela 1 – Traço e dosagens dos compostos cimentícios utilizados na classe do concerto de projeto

Classe Concreto	CIMENTO		AREIA		BRITA I (5-15 mm)		BRITA II (15-30 mm)		ÁGUA
C20/25 1:2:3	Kg	m3	Kg	m3	Kg	m3	Kg	m3	Litros
	330	0,300	710	0,595	405	0,305	835	0,625	110

3. DESCRIÇÃO E COMENTÁRIO DA EXECUÇÃO DA OBRA

Os riscos e desafios deste tipo de obras são imensos, pois não existem soluções padronizadas perante uma multiplicidade de variáveis que nem sempre são detetáveis na fase da orçamentação. Dada a escassa acessibilidade e difícil progressão nas montanhas, impunha-se desde logo a necessidade de abrir caminhos, sem perturbação do ecossistema, para fazer chegar os materiais de construção e os equipamentos de produção de concreto, o mais próximo possível das veredas que comunicam o canal. Para tal, foram providenciadas diversas plataformas de trabalhos estrategicamente posicionadas a cotas superiores á passagem do canal, para acumulo dos materiais de construção ou mesmo para fabricação controlada do concreto de projeto. Seguidamente era instalada uma conduta PVC de diâmetro Φ200 mm ou Φ300 mm, para assegurar por gravidade o fornecimento dos referidos materiais de construção numa dada bacia de retenção construída nas imediações do canal. Sempre que era possível transportar uma betoneira até á Levada, o concreto era fabricado no local sendo que os inertes eram transferidos pela conduta. Não sendo possível a situação anterior, a amassadura do concreto era produzida por uma autobetoneira instalada na referida plataforma e transferida pela conduta, até a bacia de retenção de onde se procedia a nova mistura, para correção da eventual segregação (Figura 9).



Figura 9: Transferência do concreto através de conduta PVC, proveniente de plataforma a cota superior (do autor)

Até então, era prática comum o transporte manual tanto dos escombros residuais de obra quanto dos inertes e do cimento pelos trabalhadores, exigindo um esforço sobre-humano. Caso a dimensão das veredas permitisse, eram introduzidos pequenos carrinhos de mão (manual ou motorizados), mas sem grande expressão pela dificuldade de progressão, percebendo-se desde logo a dificílima tarefa de cumprimentos dos prazos, pelo baixo rendimento de obra.

ISBN 978-65-86819-05-2

Rapidamente se concluiu que o sucesso da obra parecia depender muito mais da introdução de inovação tecnológica, do que propriamente de estratégias de gestão. Para tal, foram reinventados especificamente para a obra, 2 pequenos Trens telecomandados e acoplados a 7 vagonetes de 60 litros/cada, devidamente adaptados com rodados inferiores e laterais para circular dentro da levada. Além disso, foram ainda reinventados 2 guinchos motorizados, adaptados a partir de motores de dumper, bem como adquiridos 2 Camberras motorizados (mini-dumper), apropriados para circular em caminhos irregulares e confinados nas veredas e na montanha (Figura 10).



Figura 10: a) Trem motorizado com vagonetes acopladas; b) Camberra motorizado; c) Guincho motorizado (do autor)

Estas inovações tecnológicas, mudaram radicalmente o desenvolvimento dos trabalhos. Com efeito, a utilização dos meios mecânicos para além de aumentar e acelerar o volume de concreto transportado às frentes de trabalho, permitiram uma gestão mais eficiente das equipes de transporte e equipes de execução de canal, libertando recursos (mão-obra) que outrora destinados ao transporte do concreto, passaram agora a reforçar as frentes de trabalho.

A constante monitorização do andamento dos trabalhos, permitiu apurar diversas conclusões, salientando-se:
- o uso do Trem com 7 vagonetes acopladas de 60 litros/cada de concreto (420 litros/total), para uma distância média de transporte de 1 Km na Levada, contribuiu para um acentuado acréscimo de rendimento de trabalho, passando de 13.3 m/dia para 41m/dia, o que perfaz um aumento de produção de 27,7 m/dia, de execução de canal;
- por outro lado, com o uso do Trem e para o referido aumento de 27,7 m/dia de execução de canal, foi possível apurar uma redução substancial dos custos de transporte de concreto, de cerca de 613%. Isto é, mantendo a distância média de transporte de 1 Km e sabendo que para a produção de 27,7 m/dia de canal, o Trem desloca 4,78 m3 de concreto às frentes de trabalho, resulta no custo de transporte de 87,72 €/dia (que inclui a manutenção diária do Trem, despesas com 1 servente e gasolina). Comparando agora esse custo de transporte, com o custo de mão-obra necessário para garantia de igual volume de trabalho (27,7 m/dia de canal), verifica-se que serão necessários 9 homens/dia, cujo custo diário perfaz 538,02 €/dia. Calculado o diferencial de custo de transporte, obtém-se a referida redução de 613%. De salientar ainda que a introdução de equipamentos motorizados, permitiu aprimorar registos de rendimentos de obra com custos associados, até então inexistentes, beneficiando assim orçamentos futuras em obras similares.

Cabe ainda dizer que no decorrer dos trabalhos, diversos procedimentos mereceram destaque, entre os quais:
- ✓ A segurança dos trabalhadores, exigiu formação e utilização diária de equipamentos especializados (EPI e EPC), como forma de combater os perigos inerentes de trabalhos em altura, e de deslocação em veredas muito próximo de falésias vertiginosas e em alguns casos pouco consistentes. Regras de conduta, trabalho de equipe, correta utilização dos EPI e EPC e atitude preventiva, foram requisitos de destaque na sensibilização dos trabalhadores (Figura 11).



Figura 11: a) Vereda com guardas de segurança instaladas; b) c) veredas com barreiras proteção sinalizadoras (do autor)

- ✓ Sendo esta uma obra móvel, era previsível a existência de pequenos estaleiros de apoio, igualmente móveis. Para tal, foi estrategicamente posicionado num mapa da região, diversas posições de estaleiro, de forma a servir as várias frentes de trabalho, com o mínimo de distância de transporte em relação aos materiais de construção, bem como o mínimo de dispersão possível dos equipamentos e ferramentas, atribuídos às equipes de trabalho.

ISBN 978-65-86819-05-2

- ✓ Dado que os meios maquinais eram cruciais no desenvolvimento da obra, exigia-se a permanente manutenção dos mesmos, bem como a sucessiva limpeza dos canais por onde circulavam, de modo a evitar descarrilamentos súbitos.
- ✓ O controlo de procedimentos e a qualidade do concreto e da argamassa a utilizar no canal, foi uma constante da empresa, exigindo formação contínua e acompanhamento técnico dos chefes de equipa e operários, registos diariamente preenchidas, assinadas e devolvidas, para arquivo no processo de obra. No caso dos concretos e argamassas, foram realizados todos os ensaios caraterizadores de qualidade, segundo a norma NP EN 206 (1995).
- ✓ O desenvolvimento da obra foi permanentemente monitorizado, tanto em termos de prazos como de custos. Quer isto dizer que de 15 em 15 dias, era efetuada uma análise ao plano de trabalhos definitivo em vigor, com o propósito de confirmar se as quantidades de trabalho efetivas, correspondiam às previsões expetáveis para um dado período. Do mesmo modo, a faturação para cada tipo de trabalho (evidenciada na Lista Quantidades/preços unitários), era continuamente confrontada com os Custos de Fabrico ou Custos Secos, demonstrados pelos rendimentos de obra efetivos. A procura de equipas otimizadas foi uma constante, proporcional aos rendimentos espectáveis.
- ✓ De acordo com as exigências ambientais previstas em obra, foram desenvolvidas várias ações de formação destinadas aos trabalhadores e disponibilizados todos os meios de recolha de resíduos, nas frentes de trabalho e estaleiros móveis. A garantia de estanquidade absoluta em relação aos eventuais derrames de poluentes no canal (gasolina e óleo), foi um dos principais requisitos na conceção dos Trens motorizados. Além disso, a retirada do material sobrante da demolição do canal para o exterior da obra, foi providenciado por mecanismos elevatórios, ou eventualmente reaproveitado no reforço das áreas laterais ao canal e no melhoramento da robustez do piso das veredas, cobertos posteriormente com solo local preservando o aspeto natural (Figura 12 a)).
- ✓ Assim que concretado e retiradas as formas do canal (incluindo a Recuperação Total e Execução Integral), previa-se a instalação de uma manta geotêxtil sistematicamente humedecida de água por sistemas de tubos perfurados ou através de aspersores, sobre a superfície do concreto, por um período mínimo de 14 dias, com o propósito de evitar exsudação excessiva, reduzindo assim o efeito maléfico da fissuração por retração (Figura 12 b)). Em relação à Recuperação Parcial do Canal, apesar do projeto ser omisso relativamente a procedimentos de cura das argamassas, manteve-se a instalação da manta geotêxtil sistematicamente humedecida de água, por um período mínimo de 7 dias.

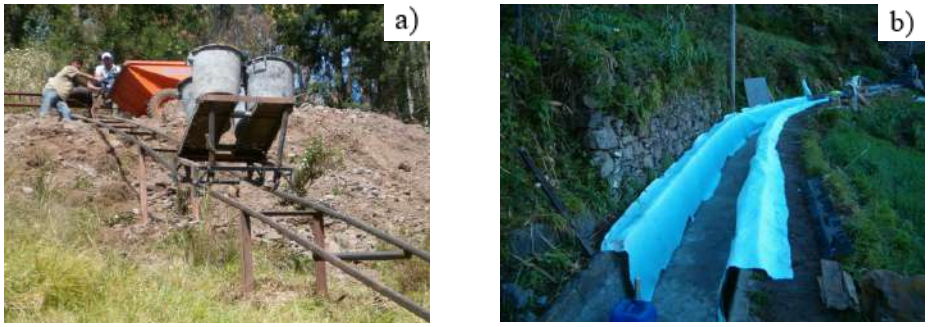


Figura 12: a) Mecanismo de elevação para retirada sobrantes; b) mantas de geotêxtil humedecidos no canal (do autor)

4. ANOMALIAS FREQUENTES EM OBRAS DE LEVADAS

Apesar do rigoroso cumprimento de todos os procedimentos previstos no projeto, duas anomalias foram frequentes.

4.1 Eflorescência

Segundo Cardeira (2010), as eflorescências são depósitos de sais acumulados na superfície de paredes ou qualquer outro elemento motivado pela evaporação de água, provocando deste modo a cristalização dos sais. Este fenómeno é também conhecido de "salitre". No caso da Levada, manifesta-se pelo aparecimento de grandes manchas esbranquiçadas, poucos dias após a concretagem, ou a aplicação da argamassa no canal. Aparentemente são eflorescências do tipo "fluffy", visto que são facilmente removíveis com água, por conterem na sua constituição finos pelos ou fibras, apresentando geralmente um elevado volume numa fase hidratada. Os cristais são aciculares e normalmente só produzem um efeito estético desagradável, não degradando o substrato a que se encontram ligados (Figura 13). Para que o fenómeno de eflorescência ocorra, é necessária a presença dos seguintes fatores intervenientes: uma fonte de contaminação de sais solúveis (sal dissolvido nas areias provenientes do mar); presença de água ou humidade nas condições necessárias; a porosidade do material onde se vai dar a cristalização e a distribuição do tamanho dos poros. Para correção desta patologia, procedeu-se á lavagem integral do canal com água, em toda a área e extensão. O fornecedor de inertes foi notificado para efetuar a correta lavagem das areias do mar (retirar o salitre), a fim de eliminar a anomalia.

ISBN 978-65-86819-05-2



Figura 13: a) b) c) Manchas - florescência nas paredes do canal (do autor); d) Eflorescência "fluffy" (Gonçalves, 2007)

4.2 Fissuração

A fissuração em canais é de extrema importância, tendo em vista que na presença de fissuras existe o vazamento de água do interior do canal para o exterior, que é prejudicial e foi um dos principais motivos que levaram à execução da obra de recuperação. Além disto, o aparecimento de fissuras causa uma redução na vida útil da estrutura devido ao aumento da corrosão no aço da estrutura, que ocorre em geral ao longo das fissuras. Desta forma, deseja-se que não haja fissuras na estrutura ou que elas sejam reduzidas ao mínimo economicamente viável.

Para a análise de fissuração, costuma-se utilizar o critério de abertura de fissuras, este critério depende dos valores de tensão aplicados no aço, do diâmetro do aço, e do espaçamento do aço. Destaca-se que para pequenos diâmetros, abaixo de 8 mm, este não costuma ser um critério crítico, tendo em vista critério normativo de dispensa de verificação de abertura de fissuras presentes na Tabela 17.2 da NBR 6118 (2014), que permite tensões de tração na armadura superiores a 400 Mpa (no Estado Limite de Serviço) para diâmetros iguais ou inferiores a 8 mm, e também presente na Tabela 7.2N do Eurocode 2 (2011), que permite até tensões de tração de até 360 Mpa em armaduras de 8 mm ou inferiores, sendo que os valores de tensão na armadura no estado limite de serviço costumam estar na ordem de 360 MPa ou inferior. As ações consideradas na verificação da fissuração de canais são: pressão hidrostática e efeitos de subpressão; empuxo de solo; temperatura; e retração. Devido às dimensões pequenas da seção transversal, tanto com relação da base quanto à altura, a pressão hidrostática e empuxo de solo costumam exigir pouco das armaduras, sendo o esforço de retração e esforços térmicos mais graves, e por isto serão comentados e verificados neste item com um pouco mais de profundidade. Os efeitos diferidos de retração e de variação de temperatura, confundem-se pois ambos são efeitos de deformações impostas a estrutura.

Análise da estrutura submetida a deformações impostas

A estrutura do canal foi caracterizada no item 2.1, necessitando acrescer apenas o limite de escoamento igual a 400 MPa (aço A400). A armadura especificada possui área igual a 0,47 cm²/m, equivalente a uma taxa de aço de 0,06% da área de concreto. Ressalta-se que a taxa de aço nesta estrutura é muito baixa, estando muito abaixo de limites mínimos especificados por normas atuais (ABNT NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2011)). O comparativo das especificações mínimas indicadas por cada norma é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações mínimas de durabilidade e segurança para a estrutura conforme diferentes normas

Norma	ABNT NBR 6118 (2014)	Eurocode (2011)	REBAP (1983)
ρ_{min}	0,15%A_c	-	0,25%A_c
$A_{s,min}$ [cm²/m]	1,2	$k_c k f_{ct,eff} A_{ct}/\sigma_s = 2{,}53$	2,0
f_{ctm} [MPa]	2,2		
ε_{cs} [‰]	0,150	0,375	0,150

Em que ρ_{min} é a taxa mínima de aço; A_c é a área bruta de concreto; $A_{s,min}$ é a armadura mínima; f_{ctm} é a resistência média a tração do concreto; ε_{cs} a deformação devida à retração; k_c é um coeficiente que leva em conta a distribuição de tensões na seção transversal; k é o coeficiente que permite o efeito de tensões de auto-equilíbrio não uniformes, que levam a uma redução das forças de restrição; $f_{ct,eff}$ é a resistência a tração efetiva do concreto (igual ao f_{ctm}); e σ_s é a máxima tensão no aço no estado limite de serviço para causar a abertura de fissuras desejada.

O fenômeno de retração é a redução do volume de concreto, usualmente associada a saída de água da massa (exsudação), que quando impedida gera esforços de tração no concreto. O fenômeno de retração é dividido em quatro diferentes tipos: retração plástica; retração química; retração hidráulica; e retração térmica. A mais comum é a retração plástica (por exsudação), que ocorre em idades iniciais do concreto.

ISBN 978-65-86819-05-2

Neste trabalho é avaliada a retração do concreto por meio da formulação específica apresentada na NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2011) e REBAP (1983). É importante ressaltar que a ABNT NBR 6118 (2014), assim como o REBAP (1983), permite a adoção da deformação específica por retração igual a $15x10^{-5}$, desta forma, este é o valor adotado. Por outro lado, o Eurocode 2 (2011) não tem valor usual recomendado, havendo sido feito o cálculo exato para cimento CEM II/A e umidade relativa de 70% (valor de umidade a favor da segurança para a região da obra).
A partir dos valores apresentados para a deformação por retração, percebe-se que a deformação acima de 0,15‰ ultrapassa a resistência a tração do concreto, não havendo, portanto, restrição por parte do concreto (que encontra-se fissurado e tem a resistência a tração desprezada). Desta forma pode-se concluir que a armadura dimensionada para a seção transversal, além de ter de atender a armadura mínima (especificada na Tabela 2), deve resistir no MÍNIMO ao mesmo esforço de tração do concreto, dado pela equação (1).

$$A_s = \frac{f_{ct,ef} A_{ct}}{\sigma_s} \quad (1)$$

A resolução da equação (1) resulta na área de aço mínima para combate ao efeito de retração igual a 2,53 cm²/m, muito acima do valor especificado na obra de 0,47 cm²/m. Entende-se que é possível usar na verificação a resistência ao escoamento total do aço, tendo em vista o tipo de aço utilizado e o diâmetro das armaduras. Destaca-se que a utilização de aços mais resistentes (A500 ou CA-50) traria benefícios á estrutura pois seria possível utilizar menores áreas de aço.
A armadura devida à variação térmica pode ser calculada de forma análoga, tomando o cuidado que no caso de dilatação térmica o esforço gerado seria de compressão.

Interação solo-estrutura
No caso de uma variação térmica (seja de dilatação ou de retração), o atrito entre solo-estrutura irá impedir a movimentação da estrutura, gerando esforços axiais na estrutura. É importante perceber que além dos esforços normais se tem momentos fletores, tendo em vista que o atrito não é aplicado no centro de gravidade da peça (Figura 14).

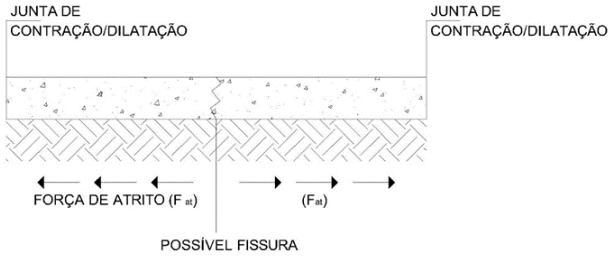


Figura 14: Força de atrito atuante em canal devido ao atrito solo-estrutura (adaptado de Montañés (2006))

É possível calcular a tensão em regime elástico, pela equação (2), que se limitada á tensão resistente de tração do concreto, dada na Tabela 2 permite o cálculo de um comprimento L máximo sem juntas para que não se alcance o esforço de tração que cause a fissura do concreto. Destaca-se que nesta equação faz-se presente a parcela de força axial aplicada pela F_{at} e a parcela de flexão devida à excentricidade da aplicação da F_{at}. Mais detalhes sobre esta consideração podem ser encontrados em Montañés (2006).

$$\sigma_m = \frac{F_{at} \times L}{2 \times b_w \times h} + \frac{\left[\left(F_{at} \times \frac{L}{2} \times e\right) \times e\right]}{I} = \frac{F_{at} \times L}{2 \times b_w \times h} + \frac{3 \times [F_{at} \times L \times h^2]}{2 \times b_w \times h^3} = \frac{2 \times F_{at} \times L}{h} \rightarrow \quad L = \frac{(f_{ct} \times h)}{2 \times F_{at}} \quad (2)$$

Calculando a força de atrito, facilmente se chega ao valor de 1,15 kN/m, considerando o coeficiente de atrito solo-concreto igual a 0,577 para um ângulo de atrito igual a 30º, conforme Moliterno (1994). A partir da formulação exposta, calcula-se um comprimento máximo de 76,5 metros entre juntas de dilatação, para que não ocorram fissuras devidas ao atrito com solo.

5. JUNTAS DE DILATAÇÃO

O projeto eficiente e juntas de dilatação, é um dos maiores desafios da engenharia civil. Especificamente em canais, é importante que a junta resista aos esforços solicitantes e garanta a estanqueidade do canal, sem criar "caminhos mais fáceis" para a passagem de água. Salienta-se que durante o uso da estrutura de canais, a retração termoigrometrica não ocorre, conforme Guerrin e Lavaur (2003). Isto significa que a preocupação principal ocorre em idades iniciais do concreto, enquanto a estrutura não está em uso.

ISBN 978-65-86819-05-2

Uma das juntas mais simples que podem ser utilizadas é a combinação de um material deformável juntamente com material betuminoso. Este tipo de junta possui uma desvantagem, que é: 1) no caso de dilatação térmica, pode haver saída do material betuminoso da junta, causando danos à junta. (MONTAÑÉS, 2006). O detalhe da junta pode ser visto na Figura 15 a). É importante falar também sobre juntas de cobre Figura 15 b), que são usadas de maneira frequente em canais. Elas se adaptam bem a movimentação dos trechos do canal, contudo, a aderência entre concreto-cobre e o alto custo da junta a tornam menos utilizada que a junta elastomérica, comentada a seguir.

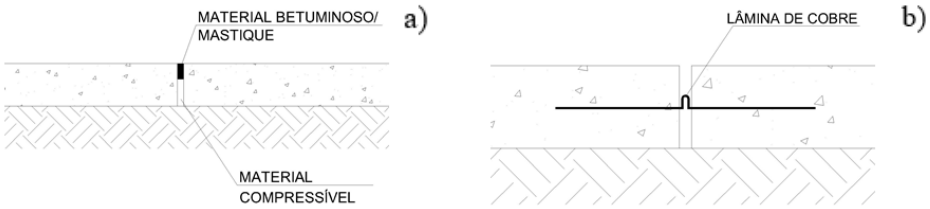


Figura 15: a) Junta combinando materiais betuminoso e compressível; b) Junta de cobre (adaptado de Montañés (2006))

A primeira solução de junta elastomérica é apresentada na Figura 16 a). Esta junta é bastante adequada para obras hidráulicas, sendo sua aplicação realizada com aplicação de primer e cola epóxi. A presença de abas laterais adiciona um pouco de segurança caso ocorra a falha da junta (devido ao deslocamento, ou descolamento da face, por exemplo), neste caso, as abas impedem o vazamento de água. A segunda solução, considerada clássica, é a utilização de juntas Waterstop, apresentada na Figura 16 b). Como usualmente as paredes e lajes de canais são de pequenas espessuras, a utilização deste tipo de junta impõe uma seção não armada dado que a armadura deve ser interrompida antes da junta. Por último, salienta-se que é possível utilizar dois perfis Fugenband paralelos, caso a exigência de estanqueidade seja muito grande, evitando assim caminho fácil de saída de água, na eventualidade de existir material mal compactado no entorno da junta.

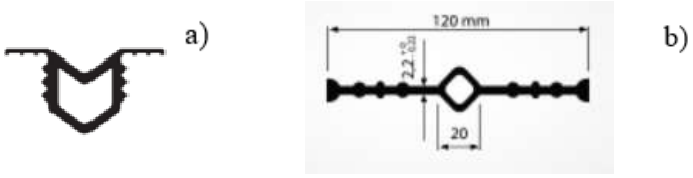


Figura 16: a) Perfil de junta (UNIONTECH, 2016); b) Perfil de junta Waterstop (FUGENBAND)

6. PROPOSTAS DE MELHORIA AFETAS AO PROJETO E EXECUÇÃO DE OBRA

No que concerne ao projeto, são recomendadas 3 modificações, sendo estas: aumento da seção de aço, com consequente aumento de resistência da peça; aumento da espessura da peça; e utilização de juntas elastoméricas. Estes três itens são discutidos a seguir. Conforme foi demonstrado no item 4.2. para que seja garantido o atendimento da peça ao Estado Limite de Serviço no que diz respeito a fissuração seria necessário o aumento da área de aço para 2,53 cm²/m. Esta condição é atendida utilizando malhasol electrossoldada do tipo NQ60 ou NR60/5, com barras de 6 mm de diâmetro espaçadas de 10 cm. O aumento da espessura da peça justifica-se para não haver perda de cobrimento quando a área de aço for aumentada, garantindo assim a durabilidade prevista do canal. Destaca-se que o aumento de apenas 1 cm de espessura garante o cobrimento no presente caso. Entretanto, o aumento de espessura causa a necessidade de recálculo da armadura, sendo que até 9 cm a malha NQ60 atende. Por último, a utilização de juntas traz benefícios, sendo recomendável um espaçamento inferior ao calculado no item 4.2, de cerca de 76,5 m. É importante ressaltar que o cálculo realizado em 4.2 é a favor da segurança, tendo sido considerado um ângulo de atrito de 30º com rugosidade alta (MOLITERNO, 1994), o que é avaliado com menor rigor por outros autores. Dentre as juntas presentes no item 5, considera-se que a mais recomendável é a junta waterstop, escolhendo de forma adequada o tamanho da junta (com espessura da junta de no mínimo 1,2 cm, referente ao deslocamento máximo dos trechos do canal), e tomando o devido cuidado com a vibração do concreto nas proximidades da junta, para evitar aglomeração de britas (bicheiras) e consequentemente zonas de fácil passagem de água.

No que concerne à execução de obra, recomenda-se os seguintes procedimentos: utilização de misturas (ou traços) de concreto adequados, redução do fator água/cimento para níveis da ordem (≈ 0,20 a 0,38), com adição de superplastificante nas proporções indicadas, para obtenção de volume de capilares muito reduzido e consequente produção de pasta de cimento muito densa. Cumpridos tais requisitos, estão garantidas condições de durabilidade, resistência mecânica e demais aspetos qualitativos do concreto, sem esquecer o aumento da trabalhabilidade (necessária, no caso de escoamento do concreto através da conduta de PVC). Propõe-se a adição de rede de fibra de vidro no interior

ISBN 978-65-86819-05-2

da argamassa de cimento com fibras de polipropileno para aplicação na solução de projeto "Recuperação Parcial do canal", em substratos degradados com substancial índice de fissuração, cujas larguras e profundidades sejam expressivas (superiores a 5 mm). Destaca-se que as fibras de polipropileno são adequadas para a redução da fissuração na fase de deformação plástica (retração plástica), todavia não controlam os efeitos de retração por secagem (retração hídrica). Por este fato, propõe-se a utilização conjunta das fibras e da rede de fibra de vidro na argamassa de cimento, com vista ao impedimento da propagação das fissuras provenientes do substrato, para o reboco aplicado. Deste modo, assegura-se uma solução qualitativamente superior.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A obra, de maneira geral, foi um sucesso. A Levada encontra-se em bom funcionamento e sem patologias significativas, tendo sido alcançado o objetivo da recuperação. Em termos de projeto demonstrou-se prático, eficiente e completo porque incorpora adaptabilidade ao meio, conhecimento técnico e tecnologia de ponta. Contudo, no caso de Recuperação Parcial do canal sugere-se a adição de fibras de vidro no interior da argamassa, para reduzir efeitos de retração e a propagação de fissuras provenientes do substrato para o reboco. Já para as soluções de Execução Integral e Reparação Total do canal, sugere-se a utilização de menores fatores a/c com adição de superplastificante, para redução do volume de capilares e consequente pasta de cimento densa, proporcionando condições de segurança e durabilidade das estruturas. A adoção de juntas de dilatação para evitar os efeitos de variação de temperatura e o aumento da armadura para combater os efeitos de retração, poderiam ser um forte contributo para a redução das microfissuras, aumentando assim o desempenho e a durabilidade das estruturas. Salienta-se que as microfissuras ocorridas no canal (a cada 2 juntas de concretagem, perfazendo no geral 80m entre si), vão de encontro com os cálculos realizados no artigo e enfatizam a importância de um maior estudo no mecanismo de juntas. Finalmente, em termos de execução, apesar da complexidade da obra e das inúmeras dificuldades, foram superadas pela introdução de inovações tecnológicas, tornando-se indispensáveis no término da obra dentro dos prazos contratuais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

CARDEIRA, A. **Análise macroscópica do efeito de dois modificadores de cristalização com baixa toxicidade**, Dissertação Mestrado em Eng. Civil, especialidade de Reabilitação de Edifícios, FCT / UNL, Lisboa, 139 p. 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 2: **Design of concrete structures - Part 1-1**: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: Cen, 2011. 225 p.

FUNGENBAND. **Tipos de juntas.** Disponível em: <https://www.fugenband.com.br>. Acesso em: 10 Jan. 2020.

GONÇALVES, T. **Cristalização de sais solúveis em materiais porosos**. Apresentação ao Seminário Materiais em ambiente marítimo, Funchal. Versão de 20 de Junho de 2009, 72 p. 2007.

GUERRIN, A.; LAVAUR. R. C. **Tratado de concreto armado:** Reservatórios, Caixas D'Água, 3. ed. Hemus, 2005.

LAMAS, M. **Arquipélago da Madeira – maravilha atlântica**. Editorial Eco do Funchal, Funchal, 1956

MOLITERNO, A. **Caderno de Muros de Arrimo.** 2. ed. Edgard Blucher, 1994.

MONTAÑÉS, J. L. **Design, construction, regulation and maintenance.** New York: Taylor And Francis, 2006.

NP EN 206: **Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade**. IPQ - Portugal, 1995.

QUINTAL, R. **Levadas da Ilha da Madeira. Da epopeia da água ao nicho de turismo ecológico.** Centro de Estudos Geográficos-Universidade Lisboa (Portugal). Revista ambientalMENTEsustentable, vol. l, nº 11-12, p. 137-155, 2006

REGULAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO. REBAP. Lisboa, 1983.

UNIONTECH. **Tecnologia de Juntas:** Manual técnico. 2016.

VIEIRA, A. **AS Levadas. Os caminhos de água na Madeira.** Cadernos CeHa. nº 9, p. 59, 2015