

**Controlo de qualidade da construção do
núcleo de asfalto de barragens de aterro
O caso da Barragem de Mogliçë, Albânia**

Sérgio Alexandre São Martinho Patrício

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Mestrado integrado)

Orientadora: Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

março de 2022

Agradecimentos

Através destas palavras simples, mas sinceras, apresento a minha gratidão às pessoas e entidades que tornaram possível a concretização deste trabalho, sem as quais seria difícil a sua conclusão.

Em especial, à minha orientadora Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida pelo apoio incondicional, constante incentivo e encorajamento, pelas orientações e conselhos sábios. Agradeço-lhe também pela amizade e pelos momentos de boa disposição sempre presentes. Um grande abraço.

À Universidade da Beira Interior, pelo contributo na minha formação e apoio dado pelos vários professores do DECA.

À empresa InfraLab, Laboratório de materiais Lda., na pessoa da Elisabete de Almeida Serrano, pelo apoio e autorização de utilizar os dados recolhidos.

À empresa WALO International AG / Hydraulic Asphalt Engineering, na pessoa do Eng. Cornelius Torkuhl, pelo apoio e pela possibilidade dada em integrar a equipa que realiza estes projetos assim como a autorização de utilizar os dados recolhidos.

A minha companheira Elisabete e ao meu filho Yuri por me terem acompanhado em todo o meu percurso, pela sua paciência e compreensão, pela ajuda e apoio incondicional nos momentos difíceis, sempre com um sorriso e bem-humorados.

Em particular, à minha mãe Carmina e ao meu pai Augusto por tornarem este projeto de vida possível, pelos ensinamentos que me transmitiram e por estarem sempre presentes na minha vida.

À minha família, em especial ao meu irmão, Francisco, pelo encorajamento e ânimo nos momentos mais trabalhosos, pela atenção, apoio e ajuda que me deram para chegar até aqui e em todos os momentos ao longo da vida.

Resumo

A nossa sociedade enfrenta atualmente vários constrangimentos em sequência do agravamento dos fenómenos climáticos extremos, manifestados na escassez de água e nas precipitações intensas. Adicionalmente, o aumento da população tem levado a uma enorme necessidade de água tanto para o consumo humano como para a produção de energias limpas de modo a reduzir os níveis de emissões de CO₂. De forma a satisfazer as exigências da nossa sociedade atual, têm vindo a ser construídas por todo o mundo cada vez mais barragens de aterro com núcleo asfáltico, quer pela sua segurança quer pela sua rapidez de construção em praticamente todos os locais com as características mais desafiantes.

Este trabalho descreve a metodologia utilizada pela empresa Suíça WALO International AG na construção e controlo de qualidade do núcleo asfáltico da barragem de Mogliçë na Albânia e comprova que a mesma é adequada para qualquer obra. Também neste trabalho é apresentado o equipamento de pavimentação do núcleo asfáltico mais avançado do mundo, permitindo a rapidez de construção e a qualidade exigida neste tipo de projetos onde qualquer falha pode vir a ter custos elevadíssimos para a sua reparação.

A metodologia utilizada para o controlo de qualidade neste projeto nunca colocou em causa o avanço dos trabalhos dentro dos prazos definidos o que prova ser uma forma adequada e muito útil para manter os elevados padrões de qualidade exigidos pela empresa Suíça.

Palavras-chave

Barragem de aterro; Controlo de qualidade; Mistura betuminosa impermeável; Núcleo asfáltico

Abstract

Our society is currently facing a number of constraints following the worsening of extreme weather events, manifested in water scarcity and intense rainfall. In addition, the population growth has led to an enormous need for water for both human consumption and the production of clean energy to reduce CO₂ emission levels. In order to meet the demands of our current society, more and more Asphalt Core Embankment Dams have been built around the world, due to their speed of construction in virtually every location with the most challenging features as well as for their safety.

This work demonstrates the methodology applied by the Swiss company WALO International AG in the construction and quality control of the asphalt core of the Mogliçë dam and proves that the methodology used is suitable for any construction. In this work it is also presented the paving equipment of the most advanced asphalt core in the world, allowing the speed of construction and the quality required in this type of projects where any failure may come to have very high costs for its repair.

The methodology used for quality control in this project has never compromised the progress of work within the defined deadlines. This proves to be an appropriate and very useful way to maintain the high-quality standards required by the Swiss company.

Keywords

Asphalt core; Embankment Dams; Impermeable bituminous mixture; Quality control

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Enquadramento temático	1
1.2 Objetivos do estudo	1
1.3 Organização do trabalho desenvolvido	1
Capítulo 2 - Barragens de aterro com núcleo asfáltico	3
2.1 Introdução	3
2.2 Historial e aspetos gerais	3
2.3 Características dos núcleos asfálticos	5
2.3.1 Vantagens e inconvenientes	6
2.3.2 Características económicas	8
2.3.3 Características ambientais	8
2.3.4 Influência climática na construção das ACEDs	9
2.4 Métodos construtivos	11
2.5 Características gerais de projeto	14
2.6 Núcleo asfáltico e zonas de filtro	15
2.7 Plinto e galeria	17
Capítulo 3 - Materiais, metodologia e equipamentos	21
3.1 Introdução	21
3.2 Materiais	21
3.2.1 Agregados e Filer	21
3.2.2 Betume	22
3.3 Estudo da mistura betuminosa	23
3.3.1 Curva de Fuller	25
3.3.2 Formulação da mistura	26
3.3.3 Caracterização adicional da mistura	27
3.3.3.1 Ensaio Triaxial de carregamento estático	27
3.3.3.2 Ensaio triaxial de carregamento cíclico	27
3.3.3.3 Ensaio de flexão	27
3.3.3.4 Avaliação da trabalhabilidade	28
3.3.3.5 Ensaio de Permeabilidade	28
3.4 Equipamentos	29
3.4.1 Central betuminosa	29
3.4.2 Equipamento de pavimentação e compactação	31
3.4.3 Laboratório de obra	34
Capítulo 4 - Controlo de qualidade da construção o núcleo asfáltico – caso de estudo	37
4.1 Introdução	37

4.2 Enquadramento da obra	37
4.3 Ensaaios laboratoriais	38
4.3.1 Caracterização dos materiais	39
4.3.1.1 Agregados	39
4.3.1.2 Filler comercial	41
4.3.1.3 Betume	42
4.3.2 Formulação da mistura betuminosa	42
4.3.3 Caracterização da mistura betuminosa	45
4.3.3.1 Sensibilidade à água	45
4.3.3.2 Permeabilidade sob pressão	45
4.3.3.3 Ensaio Triaxial	47
4.3.4 Trecho experimental	49
4.3.4.1 Construção do trecho experimental à mão	49
4.3.4.2 Ensaaios realizados	50
4.3.4.3 Controlo da espessura da camada após compactação	51
4.3.4.4 Construção do trecho experimental com a máquina	52
4.4 Gestão da qualidade durante a construção	54
4.4.1 Agregados, filler e betume	54
4.4.2 Mistura betuminosa produzida em central	55
4.4.3 Carotagem	62
4.4.4 Controlo da temperatura do núcleo asfáltico em profundidade	63
Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros	66
Referências bibliográficas	69

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Perfil tipo da barragem de Vale do Gaio (Pimenta, 2008).....	4
Figura 2.2 - Terraplenagem após a colocação do núcleo asfáltico (Barragem de Kaleköy, Turquia 2019)	7
Figura 2.3 - Reservatório de bombagem com revestimento a relva (Reservatório de Ludington, USA).....	9
Figura 2.4 – Condições climatéricas severas (Barragem de Skjerkevatn, Noruega 2016)	10
Figura 2.5 – Condições climatéricas quentes (Barragem de Kaleköy, Turquia 2019) ...	10
Figura 2.6 – Barragem Finstertal, Austria (M. Mergli, 2016)	15
Figura 2.7 - Esquema geral e definição de zoneamento para barragens com núcleo asfáltico	16
Figura 2.8 - Construção do plinto de betão (Barragem de Alpaslan II, Muş, Turquia 2019)	18
Figura 2.9 - Galeria, Barragem Feistritzbach, Austria (Adaptado de ICOLD, 2018)	19
Figura 3.1 – Corte de Marshal com agregados grossos flutuantes visíveis	21
Figura 3.2 - Curva granulométrica de Fuller, norma Europeia.....	25
Figura 3.3 - Curva granulométrica de Fuller, norma Americana	25
Figura 3.4 - Exemplo da flexibilidade de um núcleo asfáltico (Barragem de Mogliçë, Albânia 2019).....	28
Figura 3.5 - Recente máquina de pavimentação do núcleo asfáltico da WALO (Barragem Skjerkevatn, Noruega 2016)	31
Figura 3.6 - Compactação final do núcleo asfáltico (Barragem Skjerkevatn, Noruega 2016)	32
Figura 3.7 - Compactação da zona de filtro (Barragem de Alpaslan II, Muş, Turquia 2019)	34
Figura 4.1 - Localização da obra (Google Maps).....	37
Figura 4.2 - Seção Transversal através do Eixo da Barragem (Statkraft, 2017).....	38
Figura 4.3 - Seção Transversal através do Perfil do Núcleo Asfáltico (Statkraft, 2017).	38
Figura 4.4 - Grau de recobrimento dos agregados	41
Figura 4.5 - Curva granulométrica da mistura de agregados	43
Figura 4.6 - Representação esquemática da câmara de pressão para a determinação da permeabilidade	46
Figura 4.7 – Gráfico ensaio triaxial tensão/deformação	48
Figura 4.8 – Gráfico ensaio triaxial deformação axial/deformação volumétrica	48
Figura 4.9 - Construção do trecho experimental à mão: a) Colocação do filtro ao redor da cofragem; b) Controlo de temperatura da mistura antes de aplicada; c) Verificação das espessuras d) Colocação da mistura dentro da cofragem; e) Remoção da cofragem; f) Compactação do núcleo asfáltico	50
Figura 4.10 - Extração de carotes no trecho experimental à mão	51
Figura 4.11 - Controlo da espessura e forma das camadas	51
Figura 4.12 - Esquema transversal da forma das camadas	51
Figura 4.13 - Esquema da secção experimental.....	52
Figura 4.14 - Construção do trecho experimental com máquina: a) Local de construção; b) Controlo da temperatura da mistura antes de aplicada; c) Recolha de amostra para o laboratório; d) Carregamento dos silos da máquina; e) Aplicação simultânea do núcleo asfáltico e respetivo filtro; f) Compactação do núcleo asfáltico; g) Compactação do filtro; h) Controlo da temperatura do núcleo; i) Finalização do trecho experimental ...	52
Figura 4.15 - Extração de carotes no trecho experimental com máquina	53
Figura 4.16 - Provetes para realização de ensaios	53
Figura 4.17 - Curvas granulométricas tipo	54
Figura 4.18 - Granulometria DACL 16 B70/100 – 2017.....	55
Figura 4.19 - Teor em betume DACL 16 B70/100 - 2017	56

Figura 4.20 - Volume de vazios DACL 16 B70/100 - 2017.....	56
Figura 4.21 - Percentagem de filer DACL 16 B70/100 - 2017	56
Figura 4.22 - Granulometria DACL 16 B70/100 - 2018.....	57
Figura 4.23 - Teor em betume DACL 16 B70/100 - 2018	57
Figura 4.24 - Volume de vazios DACL 16 B70/100 - 2018	58
Figura 4.25 - Percentagem de filer DACL 16 B70/100 - 2018	58
Figura 4.26 - Granulometria DACL 16 B160/220 - 2018	59
Figura 4.27 - Teor em betume DACL 16 B160/220- 2018	59
Figura 4.28 - Volume de vazios DACL 16 B160/220 - 2018	60
Figura 4.29 - Percentagem de filer DACL 16 B160/220 - 2018	60
Figura 4.30 - Granulometria DACL 16 B160/220 - 2019	61
Figura 4.31 - Teor em betume DACL 16 B160/220- 2019	61
Figura 4.32 - Volume de vazios DACL 16 B160/220 - 2019	62
Figura 4.33 - Percentagem de filer DACL 16 B160/220 - 2019	62
Figura 4.34 - Carotes do núcleo e provetes	63
Figura 4.35 - Gráfico temperatura/dias zona central do núcleo asfáltico	64
Figura 4.36 - Gráfico temperatura/profundidade zona central do núcleo asfáltico.....	64
Figura 4.37 - Gráfico temperatura/dias zona dos espaldares do núcleo asfáltico	65
Figura 4.38 - Gráfico temperatura/profundidade zona dos espaldares do núcleo asfáltico	65

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Granulometrias dos agregados.....	39
Tabela 4.2 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados	40
Tabela 4.3 - Índice de achatamento dos agregados.....	40
Tabela 4.4 - Percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	40
Tabela 4.5 - Afinidade entre betume e agregados	40
Tabela 4.6 - Granulometria do filler calcário	41
Tabela 4.7 - Ensaio de caracterização do filler.....	41
Tabela 4.8 - Ensaio de caracterização do betume	42
Tabela 4.9 - Composição de agregados da DACL.....	42
Tabela 4.10 - Resultados do estudo inicial	44
Tabela 4.11 - Requisitos para misturas betuminosas densas (EAAW 2008)	44
Tabela 4.12 - Propriedades da mistura betuminosas selecionada.....	44
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água (6.2% de betume)	45
Tabela 4.14 - Resultados da permeabilidade	46
Tabela 4.15 - Propriedades da mistura betuminosas final	46
Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água (7,0% de betume)	47
Tabela 4.17 - Resultados da permeabilidade (7,0% de betume).....	47
Tabela 4.18 - Baridades das misturas com diferentes teores de betume.....	48
Tabela 4.19 - Resultados da amostra do trecho experimental.....	50
Tabela 4.20 - Resultados dos ensaios aos carotes do trecho experimental à mão	51
Tabela 4.21 - Ensaio à amostra do trecho experimental com máquina	53
Tabela 4.22 - Ensaio aos carotes do trecho experimental com máquina.....	54
Tabela 4.23 - Caracterização dos betumes B70/100 e B160/220	55
Tabela 4.24 - Carotes da mistura DACL 16 com B70/100.....	63
Tabela 4.25 - Carotes da mistura DACL 16 com B160/220.....	63

Lista de Siglas e Acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
DACL	Dense Asphalt Concrete Layer
EAAW	Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau
ACED	Asphalt Concrete Embankment Dam
ACRD	Asphalt Concrete Core Rock-fill Dam
ICOLD	International Commission on Large Dams
NVE	Norwegian Water Resources and Energy Directorate
AC	Asfalt Core
EN	Norma Europeia
EUA	Estados Unidos da América
GPS	Global Positioning System
WA ₂₄	Absorção de Água em 24 Horas
FI	Índice de achatamento
SN	Norma Suíça
VMA	Vazios na Mistura de Agregados
VFB	Vazios Preenchidos com Betume
VM	Volume de Vazios
SM	Estabilidade Marshall
FM	Deformação Marshall
ITS	Resistência à Tração Indireta
ITSR	Índice de Resistência Conservada

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Enquadramento temático

A experiência em construção de barragens de aterro com núcleo asfáltico (ACED, do inglês Asphalt Core Embankment Dams) tem mais de 70 anos, mostrando que esta é uma solução adequada sob o ponto de vista económico e ambiental. Os núcleos asfálticos, constituídos por misturas betuminosas, são especialmente utilizados como núcleos impermeáveis nas barragens de aterro.

A primeira barragem considerada de aterro com núcleo de asfalto é portuguesa e situa-se no Vale de Gaio, com 45 metros de altura, tendo sido concluída em 1948. De facto, esta solução tem vindo a aplicar-se cada vez mais em todo o mundo, sendo estas barragens construídas atualmente com altos padrões de controlo de qualidade. Por se revelarem uma solução técnica atrativa do ponto de vista económico e ambiental, e incomparáveis em termos de segurança de barragens, os núcleos de asfalto estão a ganhar popularidade, estando esta alternativa a ser cada vez mais utilizada. Nos últimos anos, várias ACEDs foram concluídas ou estão em construção em todo o mundo, muitas delas em locais com condições topográficas, geológicas e sísmicas desafiadoras.

Neste trabalho, descreve-se com detalhe a construção da barragem de Mogliçë na Albânia que foi concluída em fevereiro de 2019, nomeadamente, o controlo de qualidade das misturas betuminosas produzidas para construção do núcleo asfáltico.

1.2 Objetivos do estudo

A dissertação a desenvolver tem por objetivo descrever e analisar o processo construtivo e as fases de execução e controlo de qualidade das misturas betuminosas da barragem de aterro com núcleo de asfalto em Mogliçë, na Albânia. Estas fases incluem a formulação das misturas betuminosas em laboratório, passando pelo fabrico em central até à aplicação em obra. O trabalho visa apresentar uma visão integrada do processo construtivo e controlo de qualidade do núcleo de asfalto de barragens de aterro, que sirva de referência a implementações futuras deste tipo de soluções construtivas de barragens de aterro.

1.3 Organização do trabalho desenvolvido

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, cuja organização e conteúdo se sumaria nesta secção.

No capítulo 1, faz-se um breve enquadramento ao tema, descrevendo os principais objetivos da dissertação e uma síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se o estado da arte dos núcleos asfálticos, utilizados como núcleos impermeáveis nas barragens de aterro constituindo uma solução técnica atrativa do ponto de vista económico e ambiental, e incomparáveis em termos de segurança de barragens.

No capítulo 3, apresentam-se os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas aplicadas no núcleo asfáltico assim como os requisitos mínimos preconizados na especificação técnica alemã, “Recomendações para a execução de obras asfálticas em engenharia hidráulica (Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau – EAAW, 2008). Descrevem-se os ensaios necessários para a sua validação. Descrevem-se ainda os equipamentos utilizados tanto para a produção como para a aplicação e compactação dos materiais utilizados assim como a instalação e função do laboratório de obra.

No capítulo 4, apresenta-se a descrição do enquadramento geral da obra. Seguidamente, descreve-se o estudo inicial realizado, incluindo a caracterização dos materiais (agregados e betume), a formulação e caracterização da mistura betuminosa para o núcleo asfáltico. Apresenta-se a sequência da construção dos trechos experimentais e dos resultados obtidos. Finaliza-se este capítulo com a apresentação da metodologia utilizada na gestão da qualidade durante a produção e construção do núcleo asfáltico.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da presente dissertação e os trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Barragens de aterro com núcleo asfáltico

2.1 Introdução

Os núcleos asfálticos, constituídos por misturas betuminosas, são especialmente utilizados como núcleos impermeáveis nas barragens de aterro. Um núcleo asfáltico é um sistema de impermeabilização muito apropriado para projetos em regiões rurais onde não existem materiais naturais densos de boa qualidade ou em quantidade suficiente, como por exemplo a argila. No entanto, por se revelarem uma solução técnica atrativa do ponto de vista económico e ambiental, e incomparáveis em termos de segurança de barragens, os núcleos de asfalto estão a ganhar popularidade, estando esta alternativa a ser cada vez mais utilizada.

De facto, tem-se verificado um ressurgimento mundial das barragens de aterro com núcleo asfáltico (ACED – do inglês *Asphalt Concret Embankment Dam*) com um crescente número de projetos e construção deste tipo de barragens. A melhoria da gestão da qualidade e a evolução dos métodos e equipamentos de construção aumentaram consideravelmente as vantagens destes projetos alternativos muito competitivos.

Atualmente, as barragens estão a ser construídas em locais cada vez mais difíceis e os núcleos asfálticos, com os seus elevados padrões de controlo de qualidade associados a tempos de construção mais rápidos, estão a demonstrar ser mais adequados para projetos em locais desafiadores, nomeadamente, zonas sísmicas.

Em comparação com as faces a montante, a posição de um núcleo asfáltico, próximo do eixo central do aterro, é favorável no que diz respeito às deformações e estáticas impostas por sismos severos. O núcleo asfáltico tem de ser capaz de acomodar as tensões cíclicas e permanentes impostas pelo aterro da barragem durante a ocorrência de um sismo sem sofrer fissuras excessivas ou degradação material.

2.2 Historial e aspetos gerais

Uma das primeiras utilizações do asfalto como material impermeável data de aproximadamente há 5.000 anos. Trata-se de uma pequena barragem construída no vale do rio Indus, usando asfalto como argamassa entre pedras (ICOLD, 2018). Esta barragem ainda hoje se encontra operacional. Outras descobertas na Mesopotâmia (atual Iraque), datadas de 1300 a.C., revelaram que foi utilizada uma espécie de membrana betuminosa como barreira de água na face a montante de barragens (Kusari and Ahmedí, 2008). Também no Egito e no Peru foram encontradas várias construções antigas que mostram que o asfalto era comumente usado para construir, preservar e impermeabilizar barragens (Saxegarrd, 2000).

Em Portugal, a barragem de Vale de Gaio, com 45m de altura, concluída em 1948, foi a primeira barragem a ser construída com o que era fundamentalmente um núcleo asfáltico (ICOLD, 1992). Trata-se de uma barragem com um perfil tipo misto de terra-enrocamento, como apresentado na Figura 2.1. O maciço estabilizador de montante é constituído por solos argilosos e o maciço de jusante por enrocamento. O núcleo asfáltico, com a função de impermeabilização, localiza-se entre estes dois maciços. Esta é a única barragem construída com um núcleo asfáltico em Portugal.

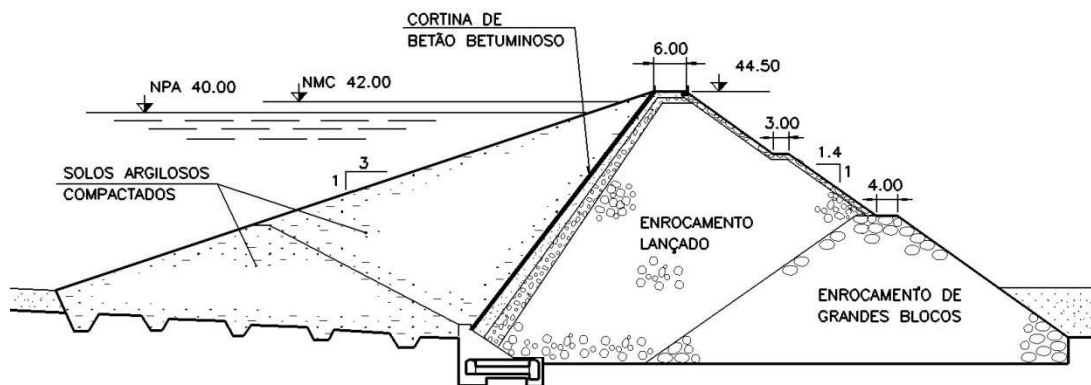


Figura 2.1 - Perfil tipo da barragem de Vale do Gaio (Pimenta, 2008)

A primeira barragem “moderna” de aterro com núcleo asfáltico mecanicamente colocado e compactado foi construída na Alemanha no vale de Dhunn em 1962 (Blake, 1989). O excelente desempenho desta ACED, que foi construída num leito de cascalho de rio, levou a que este método se expandisse primeiro na Europa, particularmente na Alemanha (com a construção da Barragem de Bremge em 1962 e da Barragem Bigge Outer em 1963) e na Áustria (com a Barragem de Eberlaste em 1968). No que diz respeito à Barragem de Eberlaste, é de referir que o assentamento total desta foi de 2,40 m devido a deformações significativas do subsolo. No entanto, a estanquicidade do núcleo asfáltico não foi afetada (ICOLD, 1992). Até à década de 70, a grande maioria das barragens norueguesas eram barragens de aterro com um núcleo de argila central. No entanto, à medida que estes materiais se tornavam cada vez mais difíceis de encontrar em novos locais de construção, o asfalto era usado como material de base de substituição. A primeira barragem com um núcleo de asfalto foi concluída na Noruega em 1978, e, desde então, quase todas as grandes barragens norueguesas foram construídas usando este método. Uma das razões para este facto é que a construção do núcleo de asfalto, quando comparada com a sua alternativa de núcleo de terra, pode prosseguir mesmo durante condições climáticas adversas.

Todos os núcleos asfálticos até então eram de tamanho pequeno a médio. O avanço para barragens altas com núcleos asfálticos ocorreu em Hong Kong em 1973 com a construção de uma barragem de 100 metros de altura do High Island Water Scheme. Após este avanço, outras barragens altas na Áustria e na Alemanha foram construídas com núcleo asfáltico, como a Barragem Finstertal (1979), a Barragem Grosse Dhuenn (1980) e a Barragem Schmalwasser (1991).

A Barragem de Danghe, a primeira barragem com núcleo asfáltico na China, foi construída em 1973 por uma empresa de construção local. A primeira (ACRD – do inglês asphalt concret core rock-fill dam) na Noruega, a Barragem Vestredal, foi construída em 1980. Outras barragens foram construídas durante o mesmo período em Hong Kong, Chile e Japão (Saxegarrd, 2000).

Durante a segunda parte da década de 1990, houve um aumento considerável da construção de barragens de núcleo asfáltico. Uma grande parte deste aumento deveu-se à atividade de construção na China. No Quebec, Canadá, a primeira ACED foi construída em 2008 e o Brasil seguiu com a sua primeira ACRD em 2010.

Devido às boas experiências e desempenho destas barragens, a altura das barragens de núcleo asfáltico também aumentou. Os principais marcos foram o núcleo asfáltico de 100 m de altura na Barragem Finstertal na Áustria, concluída em 1980, a Barragem de Storglomvatn de 128 m de altura na Noruega e a barragem de Yele de 125m na China.

A Barragem de Lower Kaleköy na Turquia, localizada na província de Bingöl pode ser considerada híbrida pois o seu corpo é formado por aterro com núcleo asfáltico na margem esquerda e betão compactado na margem direita. Este projeto, quando concluído, será a primeira barragem de núcleo asfáltico na Turquia, com uma altura do núcleo de 95 m e altura total de 107 m (Kalehan energy group, 2020).

Nos últimos anos, várias ACEDs foram concluídas ou estão em construção em todo o mundo, muitas delas em locais com condições topográficas, geológicas e sísmicas desafiadoras. Recentemente, a barragem Quxue de 174 m de altura na China e a barragem de Zarema de 153 m na Etiópia foram concluídas em 2017, e a Barragem de Mogliçë de 167 m na Albânia foi concluída em fevereiro de 2019 (Feng *et al*, 2020). A construção desta barragem será abordada com detalhe no capítulo XXX por ser o foco deste trabalho.

Várias barragens encontram-se em fase de construção, como é o caso da barragem em Bamudun, de 129 m de altura, na China. No Canadá, uma barragem com uma altura de cerca de 150 m e a Barragem do Rio Frieda com uma altura de 185 m em Papua Nova Guiné, estão atualmente em projeto preliminar, projetos estes sustentados em mais de 50 anos de experiência bem-sucedida neste tipo de construção.

2.3 Características dos núcleos asfálticos

A base para a aplicação de núcleos asfálticos em barragens é o comportamento elasto-plástico da mistura betuminosa como material de construção. Essa característica ajuda a evitar fissuras no núcleo, subsequentes às deformações do aterro, garantindo assim a sua impermeabilização (ICOLD, 2018).

As características específicas dos núcleos asfálticos são as seguintes:

- Baixa permeabilidade para garantir a estanquicidade à água;
- Alta resistência a todas as forças de carga;
- Alta flexibilidade, evitando fissuras devido a deformações impostas no aterro;
- Resistência ao envelhecimento;
- Possibilidade de formulação da mistura betuminosa do núcleo de modo a resistir aos impactos e deformações de carga esperados;
- Boa capacidade de auto-cura e resistência à erosão.

As vantagens e razões económicas para a escolha de um projeto de ACED variam consideravelmente de local para local e serão resumidas, genericamente, nas seguintes secções.

2.3.1 Vantagens e inconvenientes

As principais vantagens das ACEDs são as seguintes (Wang and Höeg, 2009):

- Os registos de desempenho das ACEDs existentes não mostram vazamentos através do núcleo asfáltico, se a barragem foi bem projetada e construída;
- As ACEDs são rápidas e fáceis de construir e a construção é muito menos influenciada pelas condições climáticas. Em áreas com elevada pluviosidade o tempo total de construção de um núcleo asfáltico é muito menor em comparação com a maioria dos outros tipos de barragens. Dentro do aterro, o núcleo asfáltico é incorporado sob condições ideais e independente dos impactos climáticos externos permanecendo flexível e impermeável durante a vida útil da barragem. Os núcleos asfálticos no interior de barragens oferecem a mais alta proteção contra danos causados por atos de guerra ou sabotagem;
- Verifica-se compatibilidade e alta resistência ao cisalhamento entre a mistura betuminosa e os materiais de aterro, bem como um apoio suficientemente elevado pelas zonas adjacentes do aterro;
- Um núcleo asfáltico é um elemento impermeável, homogéneo e sem juntas;
- As ACEDs também são adequadas em áreas sísmicas devido à alta flexibilidade da mistura betuminosa;
- Devido ao comportamento muito dúctil da mistura betuminosa e à sua capacidade de permanecer impermeável em caso de grandes deformações nos aterros, as ACEDs também podem ser projetadas e construídas se apenas houver material de baixa qualidade para o aterro;
- Como nenhuma água penetra no núcleo asfáltico, os critérios de filtro para as zonas adjacentes ao núcleo são menos exigentes em comparação com os critérios definidos para outros tipos de barragens de aterro;
- Os materiais do núcleo asfáltico são insolúveis em água, ambientalmente compatíveis e provaram não ser prejudiciais à água potável;
- As barragens com núcleos asfálticos possibilitam o seu enchimento durante a construção, permitindo a recolha de água sazonal antes da conclusão total da barragem e também

gerar eletricidade. O design da ensecadeira (Cofferdam) pode muitas vezes, pela mesma razão, ser simplificado;

Apesar de todos estes benefícios apresentados pelas ACEDs, existem alguns inconvenientes, que devem ser considerados aquando da sua construção:

- O núcleo asfáltico fica no meio da barragem, é complexo e dispendioso realizar qualquer trabalho de reparação, se necessário posteriormente. No entanto, com mais de 190 ACEDs construídas (2017), até ao momento nenhum trabalho de reparação foi necessário em barragens de núcleo asfáltico;
- A construção do núcleo asfáltico requer equipamento especializado e pessoal experiente, e esses serviços geralmente não estão disponíveis localmente. Os serviços especializados são considerados necessários devido aos requisitos de alta qualidade para o núcleo asfáltico na barragem. No entanto, o trabalho de construção pode ser realizado por trabalhadores locais, recebendo formação preliminar e, posteriormente, sob supervisão de pessoal experiente;
- O fator limitante para o cronograma de construção é basicamente o andamento da construção do aterro;
- A construção do núcleo asfáltico e a construção do aterro central não podem começar até que a fundação de betão e os trabalhos de injeção na parte central sejam concluídos. No entanto, os taludes a montante e a jusante podem ser construídos dentro dos limites definidos (Figura 2.2);
- Se estiver prevista injeção de fundação adicional após a conclusão da barragem, deve ser incluída no projeto uma galeria sob o núcleo asfáltico.



Figura 2.2 - Terraplenagem após a colocação do núcleo asfáltico (Barragem de Kaleköy, Turquia 2019)

2.3.2 Características económicas

Os custos unitários do material do núcleo asfáltico e a construção de uma ACED não podem ser facilmente calculados, dependem das circunstâncias locais e dos principais itens listados abaixo (Wang and Höeg, 2009):

- O aluguer e a instalação de uma central de produção de misturas betuminosas adequada no local são um fator importante, a menos que exista uma central a uma distância razoável do local da construção da barragem;
- Os custos com o betume, dependendo do conteúdo da mistura (geralmente entre 6,5 e 7,5%);
- Os custos com equipamento, transporte e pessoal durante o período de construção;
- Outras influências específicas do projeto;
- O custo será conseqüentemente elevado quando o volume do núcleo asfáltico for relativamente pequeno e depender do calendário de construção;
- As ACEDs geralmente não têm manutenção nem os custos associados à mesma;
- Com núcleos asfálticos, são eliminados os impactos na paisagem das zonas de empréstimo de argila ou terra;
- A base de betão para o núcleo asfáltico é muito simplificada em comparação com o projeto de uma barragem de enrocamento com cortina de betão de acordo com as forças atuantes simplificadas, sendo mais curta em comprimento, pois está localizada na linha central da barragem;
- É prática comum e frequentemente acredita-se que as ACEDs requerem agregados com qualidade como os utilizados para o asfalto rodoviário. Se esses agregados não estiverem disponíveis, os materiais com qualidade reduzida também podem ser utilizados, no entanto, esta opção não deve comprometer a vida útil da barragem.

2.3.3 Características ambientais

As barragens de aterro com núcleo asfáltico são uma solução ambientalmente atraente. A mistura betuminosa aplicada no núcleo asfáltico não contém materiais químicos que sejam dissolvidos ou derramados para o meio ambiente. Um grande número de ACEDs é construído para reservatórios de irrigação ou água potável.

No que diz respeito às barragens de aterro em terra, a disponibilidade, o valor e o aspeto ambiental das zonas de empréstimo de argila tornaram-se cada vez mais um motivo de preocupação devido ao impacto ambiental causado. Isso não é um problema com uma ACED uma vez que o aterro da barragem pode ser retirado da área dentro do reservatório e, como tal, não é visível após a construção e enchimento do mesmo.

Em áreas montanhosas, uma barragem de aterro pode ser projetada para se encaixar naturalmente no vale. Por outro lado, em áreas urbanas ou agrícolas, a barragem de aterro pode

ser construída com material de terra na encosta a jusante, que pode ser semeada com relva ou plantada, como no reservatório de bombagem em Ludington no estado do Michigan, EUA, apresentado na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Reservatório de bombagem com revestimento a relva

2.3.4 Influência climática na construção das ACEDs

As ACEDs são hoje construídas sob todas as condições climáticas, desde climas frios e húmidos até climas muito secos e quentes. Condições húmidas e frias podem ser desafiadoras e requerem considerações especiais. Em condições climáticas quentes e áridas, o núcleo asfáltico permanecerá quente e viscoso por um longo tempo.

As zonas de filtro colocadas em ambos os lados do núcleo asfáltico fornecerão suporte lateral e horizontal no núcleo quando compactados. Isto dará ao núcleo asfáltico uma ligeira superfície côncava que é muito benéfica principalmente durante as condições de chuva nas quais a água pode fluir para as zonas de filtro. Em casos especiais, também pode ser recomendado remover com ar comprimido ou com uma escova mecânica detritos e água da chuva acumulados na camada anterior.

Estas técnicas e equipamentos tornam a construção das ACEDs muito favorável em condições climáticas severas, como apresentado na Figura 2.4 na construção da Barragem de Skjerkevatn, Noruega. A mistura betuminosa pode ser produzida na central, mesmo com temperatura ambiente negativa. A época de construção pode, portanto, ser alargada em comparação com outros tipos de barragens.



Figura 2.4 – Condições climáticas severas (Barragem de Skjerkevatn, Noruega 2016)

Os trabalhos com misturas betuminosas na barragem são normalmente interrompidos durante o inverno devido a outras limitações de construção, tais como materiais de enchimento e tubos congelados para escoamento de água, neve, etc.

Nas primeiras camadas acima da fundação de betão, onde a colocação da mistura betuminosa é manual, é necessário um aquecimento cuidadoso para não oxidar a superfície da mistura betuminosa. A colocação manual da mistura betuminosa e a sua compactação deve ser realizada numa sequência rápida em condições de ambiente frio ou húmido.

Em condições climáticas quentes, como na construção da Barragem de Kaleköy, Turquia apresentado na Figura 2.4, a colocação do núcleo asfáltico é muito simples e as propriedades do material podem ser modificadas alterando o conteúdo e o tipo de betume. Pode ser necessária uma atenção especial se as camadas inferiores colocadas nos dias anteriores não estiverem suficientemente estáveis (Wang and Høeg, 2009).



Figura 2.5 – Condições climáticas quentes (Barragem de Kaleköy, Turquia 2019)

Para a perfuração do núcleo para extração de carotes para medições do volume de vazios em clima quente pode ser necessário esperar vários dias, uma vez que a mistura betuminosa precisa de mais tempo para arrefecer. Podem ser tomadas medidas especiais para reduzir o tempo de espera antes da carotagem.

Quando a argila está disponível, as estimativas iniciais de custos são frequentemente a favor de um projeto de construção de barragem com núcleo em argila, mas tal cálculo raramente tem em conta o tempo de paralisação devido às condições meteorológicas. Em zonas com precipitação elevada, são frequentes as paragens da construção para a obtenção do teor de água ideal necessário da argila. Com um projeto ACED, o tempo de paralisação e o tempo de construção podem ser reduzidos e os custos totais de construção para o ACED serão favoráveis (ICOLD, 2018).

2.4 Métodos construtivos

Ao longo dos anos, vários métodos foram utilizados para levar a cabo a construção das ACEDs. Um procedimento de construção aplicado em algumas barragens no período anterior a 1984 é o método pedra-betume (mistura *in situ*). Neste método, utiliza-se uma cofragem de chapas metálicas ao longo dos lados da parede do núcleo, construído em camadas horizontais consecutivas com 0.2 – 0.3m de espessura. A cofragem preenche-se primeiramente com material de pedra limpa e seca, sendo posteriormente bombeado o betume de um tanque aquecido. No entanto, o alto teor de betume utilizado (30 a 40 %), o custo a ele associado e a dificuldade em controlar o conteúdo de vazios e a permeabilidade tornam este método menos atrativo nos dias de hoje (Saxegarrd, 2000).

Uma técnica diferente foi usada na Rússia para grandes barragens de aterro até 140 m de altura. A mistura betuminosa foi produzida numa central com agregados mais grossos e um teor de betume de 10 - 14% sendo posteriormente espalhada entre a cofragem metálica de 1 m de altura posicionada no topo da camada anterior. A cofragem é removida assim que a mistura betuminosa tiver arrefecido o suficiente e as zonas de filtro forem colocadas a montante e jusante do núcleo. Este método não requer a utilização de compactação ou maquinaria especializada, no entanto, o alto teor de betume torna-a pouco viável ao nível económico (Saxegarrd, 2000).

A primeira barragem de aterro com um núcleo asfáltico compactado foi construída na Alemanha em 1962. Desde então, mais de 190 núcleos asfálticos, compactados com camadas de 20 - 25 cm foram construídos. Este procedimento não requer a utilização de cofragens, com exceção das primeiras camadas em cima da fundação nas zonas de contacto com as fundações laterais, uma vez que o núcleo asfáltico é construído em simultâneo com os níveis de enchimento da barragem. Apresenta ainda a vantagem de o teor de betume ser consideravelmente inferior ao exposto nos dois métodos acima descritos (normalmente de 6,5 a 7,5 %). Além disso, esta técnica permite a melhor garantia de qualidade e controlo do núcleo asfáltico e é atualmente a tecnologia mais comum (ICOLD, 2018).

A construção de um núcleo asfáltico é geralmente fácil e rápida. No entanto, o controlo de qualidade deve ser sempre implementado em 100% devido à parede de mistura betuminosa bastante fina construída dentro da barragem. As máquinas e equipamentos usados para a

construção da ACED, bem como as equipas de pessoal, devem cumprir os mais altos padrões de qualidade.

A mistura betuminosa é normalmente colocada em camadas horizontais com espessuras de 20 a 25 cm seguidas de compactação. Cada camada é colocada em cima da anterior. Como a largura especificada é um requisito mínimo, a largura realmente colocada será um pouco maior do que a teórica, dependendo da maquinaria e da experiência do empreiteiro (Wang e Höeg, 2009).

Quando quente, a mistura betuminosa apresenta uma consistência viscosa e fluida e a zona de filtro fina, adjacente ao núcleo asfáltico, deve ser colocada simultaneamente com a mistura betuminosa, a fim de fornecer ao núcleo um suporte lateral imediato. Não deve haver contaminação do material da zona de filtro sobre ou na mistura betuminosa colocada.

Quando uma nova camada de mistura betuminosa é colocada em cima da anterior a temperatura da nova mistura aquecerá o topo da camada anterior o suficiente para as duas camadas se fundirem sem qualquer junta de ligação detetável. Por conseguinte, não é necessária a aplicação de nenhum revestimento para promover a aderência entre as camadas, a não ser em casos muito especiais.

A mistura betuminosa mantém a temperatura durante um período considerável apresentando um arrefecimento lento, como se demonstrará na secção 4.3.4. É importante que a humidade não fique retida entre as camadas, uma vez que essa mesma humidade pode resultar numa junta enfraquecida (ICOLD, 1992).

Atualmente, qualquer equipamento de pavimentação moderno está provido de aquecimento infravermelho na frente da máquina. O seu principal objetivo é garantir que não haja humidade na camada de mistura betuminosa anteriormente colocada permitindo, simultaneamente, aquecer o topo da camada. O requisito de temperatura mínima para a camada anterior e o requisito de temperatura mínima para compactação da nova camada devem ser estritamente respeitados.

A mistura betuminosa a ser colocada é densa, com alto teor de betume, agregados finos e filer. A sua compactação difere da compactação de misturas betuminosas para pavimentos de estradas à medida que os agregados são movidos para sua configuração ideal por meio de vibração, alcançando assim o requisito principal de menos de 3% de conteúdo de vazios.

Algumas máquinas de pavimentação de núcleos são equipadas com placas vibratórias para uma compactação inicial, no entanto, mesmo com placas vibratórias fixas à máquina, serão necessários compactadores adicionais para obter o conteúdo de vazios desejado.

Com equipamento de qualidade e procedimentos de colocação adequados é possível realizar a colocação do núcleo durante condições de chuva moderada e a baixas temperaturas, cerca de 0 °C.

Em condições frias, ventosas e / ou húmidas, é importante que a compactação inicial do núcleo asfáltico seja realizada rapidamente a seguir à colocação do núcleo.

O equipamento de compactação do núcleo asfáltico dependerá da largura do mesmo. A primeira compactação atrás da pavimentadora pode ser feita por meio do uso de saltitão compactador ou cilindros vibratórios. O cilindro é normalmente 15 - 20 cm mais largo do que o núcleo colocado e, portanto, também compactará parcialmente as bordas da zona de filtro adjacente. A zona de filtro exigirá mais compactação do que a mistura betuminosa densa e, portanto, é colocada em camadas mais espessas do que a mistura betuminosa. A quantidade de sobre-elevação depende muito do tipo de material da zona de filtro a ser usado. Ao especificar a sobre-elevação, é muito importante que o cilindro não esteja apenas a “andar” na zona do filtro, mas a fornecer compactação suficiente ao núcleo asfáltico.

Para barragens mais altas com largura variável do núcleo asfáltico, podem ser necessários vários cilindros com diferentes larguras de tambor para a compactação, uma vez que a largura do núcleo diminui com a altura.

A compactação das zonas de filtro em cada lado do núcleo asfáltico deve ser realizada com dois cilindros a trabalhar em paralelo. Este movimento paralelo é necessário, uma vez que o núcleo de mistura betuminosa é flexível e pode facilmente ser distorcido horizontalmente.

Durante a compactação das zonas de filtro, será imposta uma força horizontal ao núcleo asfáltico. O grau de pressão horizontal depende muito do tipo de material da zona de filtro. Uma proporção significativa de material de cascalho rolado geralmente induz mais pressão horizontal do que rocha britada. Deve assegurar-se de que o núcleo mantém a largura mínima projetada.

Devido à compactação do material da zona de filtro e ao esforço horizontal imposto ao núcleo asfáltico, a superfície da mistura betuminosa pode ficar ligeiramente convexa após a compactação do núcleo e das zonas de filtro. Se for esse o caso, pequenas fissuras longitudinais poderão ocorrer na superfície do núcleo asfáltico. Este fenómeno foi estudado em pormenor e não é motivo de preocupação. As pequenas fissuras desaparecerão quando uma nova camada é colocada em cima, aquecendo a superfície anterior e fundindo-as.

A superfície superior do núcleo asfáltico arrefecerá bastante rapidamente, mas o interior do mesmo permanecerá quente por muito tempo. Deve assegurar-se de que o núcleo asfáltico não está exposto a qualquer carga ou tensão horizontal ou vertical. Se as condições locais exigirem que o transporte de materiais seja efetuado sobre o núcleo asfáltico, pontes móveis especiais têm de ser construídas para esse fim.

A colocação manual do núcleo asfáltico e das zonas de filtro será sempre necessária no ponto mais baixo da barragem, na ligação ao plinto e em direção aos espaldares. Nessa área, a mistura betuminosa é colocada dentro de cofragem pré-instalada entre as zonas de filtro. A cofragem é

retirada à medida que as zonas são colocadas e a compactação começa. Os mesmos requisitos de qualidade aplicam-se às áreas colocadas à mão e às áreas colocadas com a máquina. Em condições frias e húmidas, a colocação manual e a compactação devem ser efetuadas rapidamente a fim de manter a temperatura mínima exigida para a compactação.

Antes de se dar início aos trabalhos com misturas betuminosas, o plinto deve ser tratado adequadamente para obter uma boa aderência com o núcleo asfáltico. Em primeiro lugar, todos os derrames de *grouting* devem ser removidos; em seguida, a película de cimento fino que cobre os agregados de betão na superfície deve ser removida. Isto pode ser conseguido através de vários métodos, mas o método do jato de areia é considerado o mais adequado, uma vez que para além de ser amigável ao ambiente também deixa uma superfície bastante áspera facilitando a adesividade entre os materiais diferentes.

Seguidamente, é aplicado um primário na superfície de betão. Após o solvente ser totalmente volatilizado, coloca-se uma camada de 1 a 2 cm de espessura de mástique asfáltico. O betão deve estar totalmente curado antes que este procedimento comece. A superfície deve ser limpa, completamente seca e aquecida por queimadores antes da sua aplicação. Deste modo, este tipo de trabalho não pode ser realizado durante períodos com precipitação.

Quando a mistura betuminosa quente é colocada, o mástique asfáltico será liquefeito e funde-se com esta. A mistura betuminosa na zona da junta será, portanto, mais rica em betume e funcionará como uma camada de dissipação de tensões (ICOLD, 2018).

2.5 Características gerais de projeto

O núcleo fino de mistura betuminosa deve ajustar-se às deformações do aterro e aos deslocamentos diferenciais na fundação da barragem. Os deslocamentos acumulados durante a construção do aterro, o enchimento do reservatório, a consolidação e fluência dependem do tempo, variações no nível do reservatório e ações sísmicas. A função essencial do núcleo é permanecer impermeável sem aumento significativo da sua permeabilidade devido ao cisalhamento por dilatação ou fissuramento. Além disso, se ocorrer uma fissura, a formulação da mistura betuminosa é feita de tal forma que a sua fluência viscosa feche gradualmente essa fissura (capacidade de auto-cura). As propriedades da mistura betuminosa podem, dentro de limites razoavelmente amplos, ser adaptadas para atender aos requisitos específicos de projeto (Zhang *et al*, 2013).

Para uma barragem com fundação num leito rochoso, a chave para limitar a deformação do aterro está nas propriedades do material, na compactação das zonas de transição e nas zonas resistentes de enrocamento (espaldares). Se o aterro se fundar em solo compressível, é provável que ocorram distorções diferenciais devido a assentamentos desiguais sob o aterro, devendo estes ser estimados e contabilizados. Algumas ACEDs foram agora construídas em condições de fundação muito desafiadoras como a Barragem de Mogliçë na Albânia.

A compactação das zonas de filtro e do núcleo asfáltico quente resultam numa boa interligação entre os dois elementos da construção. Para barragens com uma altura inferior a 100 m, o núcleo asfáltico pode deformar-se de forma coordenada com as zonas de filtro. Para barragens com uma altura superior a 100 m, o núcleo pode assentar diferencialmente alguns centímetros devido a uma maior densidade unitária e um menor módulo de deformação das zonas adjacentes. No entanto, testes em modelos de laboratório revelaram que essa deformação diferencial entre o núcleo e as zonas de transição não tem efeitos prejudiciais sobre a impermeabilidade do núcleo asfáltico (ICOLD, 2018).

Recomenda-se colocar uma zona especialmente bem compactada em ambos os lados das zonas de filtro. É possível adicionar água à compactação, além da compactação vibratória de camadas com espessura moderada. É recomendada a criação de uma zona de teste para a colocação e compactação.

Para um aterro de enrocamento bem compactado apoiado no leito rochoso com boa capacidade de suporte, os taludes de enrocamento podem ter inclinações relativamente acentuadas quanto 1:1.3 a 1:1.4, como demonstrado por exemplo na barragem de Finstertal, na Áustria (Figura 2.5) e Storvatn na Noruega. Mesmo assim, os deslocamentos máximos medidos dentro dessas barragens, de aproximadamente 100 m de altura, são muito pequenos (da ordem 0.5 m) e as deformações no núcleo muito abaixo dos níveis permitidos (Høeg, 1993).



Figura 2.6 – Barragem Finstertal, Austria (Mergili, 2016)

Em geral, as inclinações do aterro para uma ACED podem ser ligeiramente mais inclinadas em comparação com uma barragem de núcleo central de argila.

2.6 Núcleo asfáltico e zonas de filtro

Para determinar a largura do núcleo asfáltico devem ser consideradas a altura da barragem, as condições geológicas de fundação da barragem e a sismicidade no local da construção.

Em condições normais a largura do núcleo asfáltico (cm) deve ser de pelo menos 0,7 vezes a carga hidráulica (H) em metros, com uma largura mínima de 50 cm. No entanto, a Autoridade

Reguladora Norueguesa (NVE) adaptou um valor mais conservador: largura do núcleo = $0,50 + [(0,7 / 100) \times (H-50)]$. Sendo a largura mínima de 50 cm. Todas as dimensões estão em m.

Até ao final do século passado, critérios de projeto muito mais conservadores foram usados, com 1/10 da altura da barragem.

Em direção aos encontros e para a ligação ao plinto de betão, o núcleo deve ser aumentado para o dobro da sua largura. Apenas muito poucos casos têm um núcleo mais fino com aproximadamente 40 cm (ICOLD, 1992).

As zonas de filtro adjacentes ao núcleo são colocadas simultaneamente com o núcleo asfáltico e fornecem o suporte lateral necessário (Figura 2.7). Estas devem ser estáveis para suportar a máquina de pavimentação do núcleo e desempenham um papel importante no controle da deformação do núcleo de mistura betuminosa.

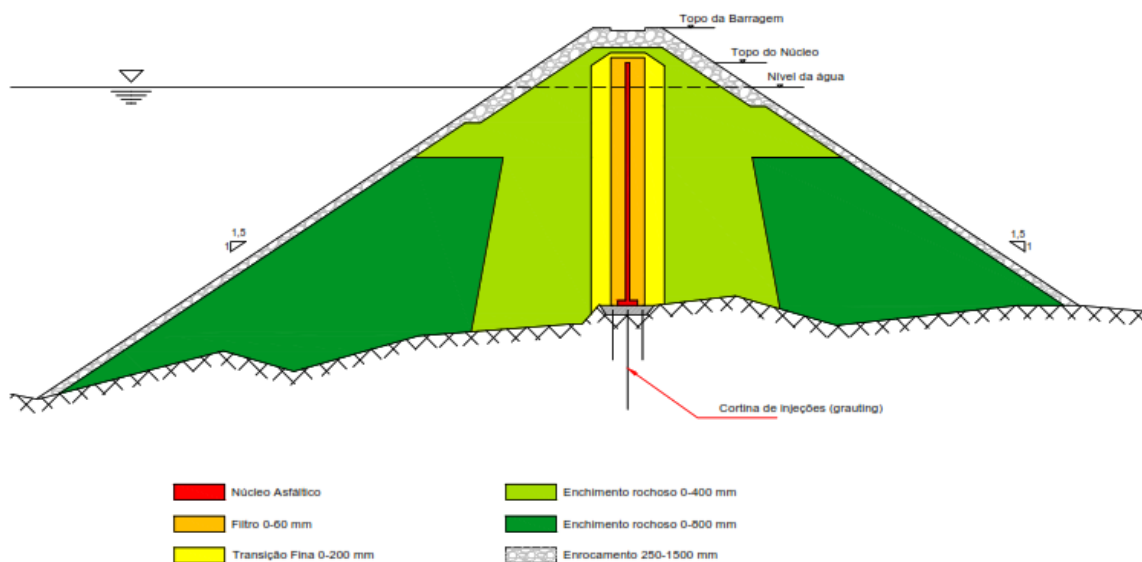


Figura 2.7 – Esquema geral e definição de zoneamento para barragens com núcleo asfáltico

Em geral, o núcleo deve ser colocado no centro da barragem. No entanto, quando uma parede de parapeito é instalada no coroamento, o eixo vertical do núcleo pode ser localizado um pouco a montante do eixo da barragem, a fim de ligar o núcleo com a parede quebra ondas.

O núcleo asfáltico é geralmente construído verticalmente do fundo até ao coroamento da barragem. Um núcleo totalmente inclinado ou parcialmente inclinado tem a vantagem de fornecer uma tensão de confinamento favorável e adicional. No entanto, um núcleo vertical está sujeito a tensões de cisalhamento menores. No caso improvável de ocorrerem fissuras e de ser necessário um trabalho de reparação através da execução de furos, estes podem ser executados mais facilmente com um núcleo vertical. Os furos são localizados na zona de filtro a montante e é injetada uma argamassa para vedar as fugas.

No entanto, em barragens muito altas, a parte superior do núcleo pode ser considerada ligeiramente inclinada para o lado jusante, a fim de reduzir o perigo de que o aterro a montante se desprenda do núcleo na área do coroamento (ICOLD, 1992).

A zona de filtro produzida a partir de agregados britados geralmente dá um suporte mais estável ao núcleo asfáltico e à máquina de colocação do núcleo do que o cascalho natural. O material do filtro pode ser humedecido para facilitar a sua compactação. Se uma porção significativa de cascalho rolado for usada para as zonas de filtro, uma alta tensão horizontal também será imposta ao núcleo de mistura betuminosa. Isso pode criar o risco de reduzir a largura do núcleo (ICOLD, 1992).

Na zona de transição a montante deve usar-se um material de drenagem mais fino e a jusante um material de drenagem mais grosso e solto. Assim, caso exista um defeito ou se abra uma fissura no núcleo, o transporte de partículas finas para a zona com defeito irá reduzir a fuga até que o fluxo viscoso e plástico do material asfáltico produza o efeito da auto-cura. Por outro lado, alguns autores são de opinião que a migração de partículas finas para uma possível fissura prejudicará a auto-cura. Desta forma, devido à excelente experiência com ACEDs, é hoje geralmente aceite que o mesmo material da zona de filtro pode ser usado tanto a montante quanto a jusante do núcleo asfáltico. A taxa de fugas através do núcleo dependerá então da largura da zona cisalhada, da sua profundidade abaixo do nível do reservatório e da permeabilidade do filtro / zonas de transição próximas ao núcleo. A adição de material de grão fino às zonas de filtro é uma boa solução para reduzir a taxa de fugas até que o nível do reservatório possa ser reduzido e as reparações executadas (Zhang *et al*, 2013).

A maioria das máquinas de pavimentação do núcleo padrão têm uma largura total de 3,5 m, mas a largura total pode ser aumentada dentro dos limites práticos. A largura total inclui as duas zonas de filtro em cada lado do núcleo e o núcleo asfáltico. Para barragens até 100 m de altura deve ter-se uma largura da zona de filtro de 1,3 a 2,0 m. Para ACEDs com mais de 150 m de altura e para barragens localizadas em áreas sísmicas, podem ser necessárias zonas de filtro mais largas. Em tais casos, as zonas de filtro serão, por razões práticas, parcialmente colocadas com a máquina de pavimentação de núcleo e a parte externa com equipamentos comuns.

A compactação intensiva das zonas de filtro pode provocar o estreitamento do núcleo asfáltico (ICOLD, 2018).

2.7 Plinto e galeria

O plinto de uma ACED é basicamente simples em projeto e construção sendo a sua localização prevista principalmente no centro da barragem, como se apresenta na Figura 2.8. O plinto é mais curto em comparação com as barragens com revestimento a montante. O objetivo principal do plinto é servir de tampa e contacto da cortina de injeção sob o núcleo. O plinto deve ser ancorado na fundação da rocha por parafusos de ancoragem. Se uma camada espessa de solo consolidado

permanecer na fundação e um plinto for projetado em cima da parede do diafragma, a estrutura de ligação entre o núcleo asfáltico e a parede de corte deve ser cuidadosamente concebida para garantir a estabilidade e a impermeabilidade da estrutura (Wang *et al*, 2017).

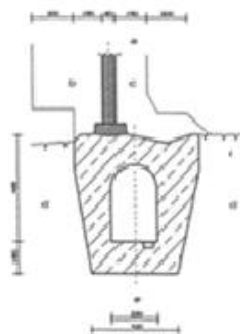


Figura 2.8 - Construção do plinto de betão (Barragem de Alpaslan II, Muş, Turquia 2019)

O plinto ou a galeria nos encontros de ligação com o núcleo asfáltico deve geralmente ser projetado sem degraus com mais de 45° de inclinação. Se a inclinação nos encontros for mais íngreme do que 60°, a superfície do plinto ou galeria deve ser inclinada em direção a montante para obter uma maior tensão induzida pela pressão da água entre o núcleo e o plinto.

O plinto ou galeria de betão é geralmente construído em blocos de 6 a 10 m de comprimento com juntas transversais (*water stops*) devendo ser projetadas de forma a evitar fugas posteriores (ICOLD, 2018). As juntas estão embutidas na mistura betuminosa e devem ser resistentes ao calor (Wang *et al*, 2017).

Uma galeria pode ser construída por baixo do núcleo asfáltico ou como parte da barragem o que resultará num aumento considerável de custo. No entanto, se for necessária uma galeria para trabalhos de injeção adicionais ou trabalhos de reparação posteriores então esta deve ser considerada no cronograma de construção, como apresentado na Figura 2.9.



- a - núcleo impermeável
- b - zona de filtro a montante
- c - zona de filtro a jusante
- d - argamassa de contato e consolidação
- e - cortina de injeção
- f - superfície rochosa

Galeria de injeção e drenagem

Figura 2.9 - Galeria, Barragem Feistritzbach, Áustria (Adaptado de ICOLD, 2018)

Capítulo 3 - Materiais, metodologia e equipamentos

3.1 Introdução

No presente capítulo apresentam-se os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas aplicadas no núcleo asfáltico assim como os requisitos mínimos preconizados na especificação técnica alemã, “recomendações para a execução de obras asfálticas em engenharia hidráulica (Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau – EAAW, 2008). Seguidamente, descrevem-se os ensaios necessários para a sua validação. Descrevem-se ainda os equipamentos utilizados tanto para a produção como para a aplicação e compactação dos materiais utilizados assim como a instalação e função do laboratório de obra.

3.2 Materiais

3.2.1 Agregados e Filer

Com o alto teor de betume e filer nas misturas betuminosas, o filme de betume/filer em torno dos agregados é bastante espesso quando comparado com as misturas comuns para estradas. Os agregados mais grossos mantêm-se “flutuantes” na mistura de finos, filer e betume (Figura 3.1) e mesmo sob pressões hidráulicas muito altas, não há risco de que o betume seja segregado para fora do núcleo.



Figura 3.1 – Corte de Marshal com agregados grossos flutuantes visíveis

Os agregados para a mistura betuminosa do núcleo asfáltico devem ser provenientes de rocha sólida e com propriedades estáveis ou uma mistura de rocha e areia ou cascalho britado. Em casos especiais, o cascalho natural pode ser usado até uma certa quantidade para aumentar a trabalhabilidade. Os requisitos de qualidade para os agregados são menos exigentes em

comparação com os requisitos para agregados usados para misturas betuminosas rodoviárias (Höeg, 1993). As diferenças na qualidade dos agregados (parâmetros de resistência, etc.) têm efeitos menores no comportamento tensão-deformação dos núcleos asfálticos em comparação com outras aplicações, como construção de estradas. No entanto, o achatamento do agregado requer maior teor de betume para obter o teor de vazios necessário (permeabilidade) e afeta também a trabalhabilidade da mistura betuminosa.

A adesividade entre os agregados e o betume é um parâmetro crítico para os revestimentos asfálticos e misturas betuminosas rodoviárias, geralmente é necessário um aditivo para melhorar esta propriedade se os agregados forem de origem ácida. O filme de betume/filer em torno dos agregados na mistura betuminosa do núcleo asfáltico é mais espesso e, portanto, a água não pode penetrar no núcleo e garante a sua impermeabilidade. Consequentemente, tanto agregados ácidos quanto básicos podem ser usados para tais misturas betuminosas sem ser necessário adicionar um promotor de adesividade.

O filer utilizado na mistura betuminosa será uma mistura de filer recuperado dos agregados e filer comercial. A central betuminosa deve ser equipada com um sistema de filtros que recupera o filer dos agregados. O filer comercial normalmente é dispendioso e será mais económico produzir agregados com um alto teor em filer. O filer recuperado normalmente não deve exceder 50% do conteúdo total de filer na mistura betuminosa. Diferentes tipos de filer podem ter grande influência na trabalhabilidade das misturas betuminosas, sendo que o filer adicionado pode ser cimento ou calcário finamente moído (ICOLD, 2018).

3.2.2 Betume

O betume neste contexto é um produto obtido a partir da destilação de petróleo bruto (crude) numa refinaria. Vários óleos e o betume extraído através do processo de refinamento têm características um pouco diferentes. No entanto, a maior parte do betume produzido em todo o mundo com o grau de penetração requerido pode ser usado na construção de núcleos asfálticos (Schonian, 1999).

O betume é um produto natural e não contém aditivos que possam poluir o ambiente ou a própria água. As misturas betuminosas para núcleos ou revestimentos superficiais são, portanto, comumente utilizados para estruturas de irrigação ou de armazenamento de água.

O betume modificado com polímero para aumentar a tensão de tração da mistura betuminosa está a tornar-se bastante comum para muitas aplicações de misturas betuminosas. No entanto, a utilização de polímeros modificadores provoca um aumento considerável do preço do betume e, geralmente, não é necessária para os núcleos asfálticos (Schonian, 1999).

O endurecimento e oxidação do betume é um fenómeno bem conhecido em pavimentos de estradas e revestimentos superficiais com misturas betuminosas. Isto é causado pela radiação solar, variações de temperatura e com a penetração do ar e humidade no pavimento. Para os

núcleos asfálticos, o material está protegido no corpo da barragem, sem radiação solar e num ambiente onde a temperatura é moderada e bastante estável. Além disso, o betume é muito denso e nem o ar nem a humidade conseguem penetrar no núcleo asfáltico. Se for utilizado um bom betume, a oxidação ou o endurecimento não são preocupação para os núcleos asfálticos após o endurecimento inicial durante a produção na central, transporte e colocação.

As barragens são projetadas para um longo período de vida útil, sendo que um betume de boa qualidade manterá o comportamento do material do núcleo durante muito tempo, quando protegido dentro do corpo da barragem de aterro. As propriedades de envelhecimento do betume selecionado devem ser controladas para todos os novos projetos de núcleos asfálticos.

Os vários tipos de betume disponíveis são geralmente designados por um valor de penetração. O tipo mais comum é B 70/100 sendo o B 50/70 menos utilizado. O betume do tipo B 50/70, com um valor inicial de penetração entre 50 e 70 10^{-1} mm, é bastante duro, enquanto, por exemplo, um betume B 160/220 é muito macio (ICOLD, 2018).

O tipo e o grau de penetração do betume têm uma grande influência nas propriedades de mistura betuminosa. Estas propriedades podem ser adaptadas às condições locais e aos critérios de conceção da barragem. As condições locais a avaliar são geralmente:

- Temperatura no local e temperatura da água no reservatório
- Potencial sísmico
- Potenciais assentamentos de fundações e aterros

Em locais onde podem ocorrer sismos consideráveis ou em locais com possíveis assentamentos de fundações, é preferível um tipo betume com um valor de penetração mais elevado.

As condições climáticas locais para a mistura betuminosa rodoviária frequentemente determinam o grau de penetração do betume disponível no país em particular. Em países com um clima quente, os betumes disponíveis são geralmente duros. No entanto, estão disponíveis aditivos que podem ser utilizados para aumentar os valores de penetração, se necessário. Além disso, o aumento do teor de betume na mistura betuminosa dentro de certos limites também produzirá um material mais dúctil, mesmo quando baseado num betume bastante duro (ICOLD, 2018).

3.3 Estudo da mistura betuminosa

A formulação da mistura betuminosa deve demonstrar a adequação dos materiais às condições locais e à conformidade com o projeto específico da barragem. As condições locais podem ser descritas por:

- Tipo de fundações;
- Assentamentos estimados da barragem durante a construção e enchimento;
- Risco de sismo e impacto potencial no local da barragem e na região;

- Condições climáticas.

Os agregados destinados a serem utilizados para o núcleo asfáltico devem ser caracterizados relativamente aos seguintes parâmetros:

- Origem e petrografia;
- Avaliação visual;
- Granulometria;
- Achatamento;
- Absorção de água;
- Afinidade com betume;
- Resistência à abrasão (Método de Los Angeles).

O filer na mistura betuminosa será constituído por um filer agregado recuperado e pelo filer comercial, por exemplo calcário, cimento ou outro material aprovado. Este deve ser caracterizado relativamente aos seguintes parâmetros:

- Granulometria do material inferior a 0,063 mm;
- Absorção de água.

O betume destinado a ser utilizado deve ser caracterizado relativamente aos seguintes parâmetros:

- Penetração (antes e depois do aquecimento);
- Anel & Bola (antes e depois do aquecimento);
- Ponto de fratura de *Fraass*;
- Propriedades de envelhecimento a longo prazo;
- Recuperação elástica (apenas para betume modificado com polímeros).

Os agregados, incluindo o filer, devem ser combinados de modo que a classificação siga a curva de granulométrica de *Fuller* dentro de limites razoáveis. Se tal não for possível, devem ser efetuados novos ajustamentos para produzir agregados mais adequados. De forma a aumentar a trabalhabilidade da mistura betuminosa, pode adicionar-se areia natural ou cascalho com uma certa quantidade de partículas arredondadas.

Normalmente, o teor de betume será entre 6,5 e 7,5 % medido em percentagem do peso total da mistura. O conteúdo de betume depende da curva granulométrica, da densidade específica dos agregados e do conteúdo de filer. Recomenda-se um teor de betume ligeiramente superior ao teoricamente suficiente para preencher os vazios da mistura agregada. Tal mistura betuminosa pode ser facilmente compactada para obter um conteúdo de vazios menor de 3% em obra e será definitivamente impermeável.

3.3.1 Curva de Fuller

A composição dos grãos minerais deve respeitar a curva granulométrica de Fuller $n = 0,45$ apresentada na Figura 3.2 e Figura 3.3) pelas normas europeia e americana, respetivamente. Dentro de limites razoáveis esta pode ser melhorada adicionando material de grão fino (material de enchimento menor 0,063 mm norma europeia e inferior a 0,075 mm norma americana).

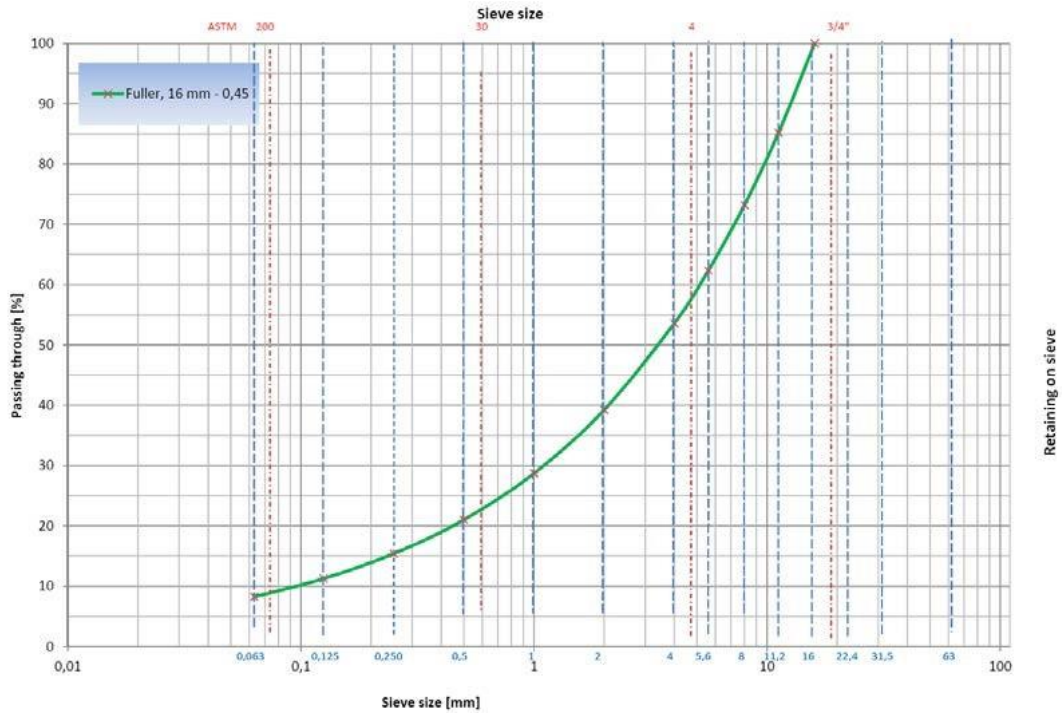


Figura 3.2 - Curva granulométrica de Fuller, norma Europeia

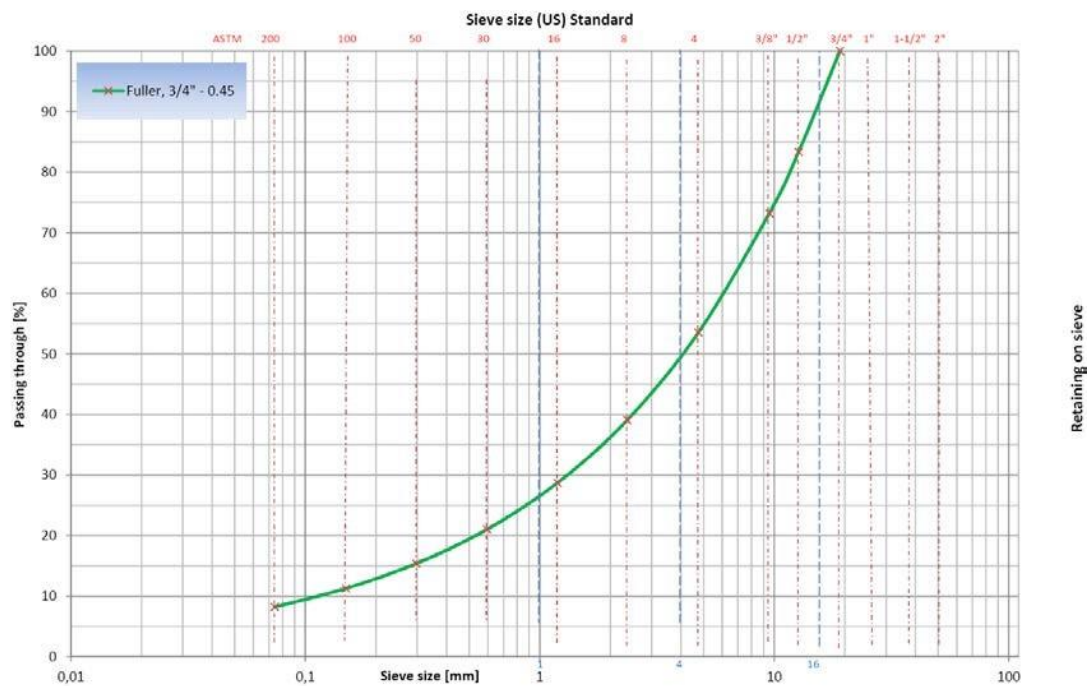


Figura 3.3 - Curva granulométrica de Fuller, norma Americana

As Figuras mostram apenas as curvas teóricas de Fuller para atingir a densidade máxima de agregados. O conteúdo de finos deve ser aumentado para a produção da mistura betuminosa para o núcleo asfáltico (*Asfalt Core - AC*) (ICOLD, 2018).

3.3.2 Formulação da mistura

A formulação da mistura betuminosa é feita com base no Método de Marshall (EN 12697-34 Marshall test). O ensaio Marshall é uma forma comum de controlar o volume de vazios e a trabalhabilidade das misturas. Deve preparar-se pelo menos três provetes Marshall por cada conteúdo diferente de betume e de filer em laboratório para otimização do volume de vazios. O conteúdo de betume para os ensaios iniciais está geralmente localizado num intervalo entre 6,5% e 7,5% do peso total, com incrementos de 0,5%.

Para os núcleos asfálticos e camadas colocadas com espessuras de 20 a 25 cm, recomenda-se que os provetes Marshall sejam compactados com 30 golpes em ambos os lados. Esta compactação geralmente corresponde aproximadamente à compactação alcançada em obra. A temperatura de compactação dos provetes Marshall depende da qualidade de betume utilizado para a aplicação específica (por exemplo, 145 ± 5 °C para betume B 70/100 – EN 12697-35 Laboratory mixing) (ICOLD, 2018).

Se o cliente ou o empreiteiro quiser avaliar a trabalhabilidade da mistura betuminosa, podem ser realizados mais ensaios com 10 e/ou 20 golpes, além dos 30 golpes normais nos provetes.

Para a decisão final sobre o conteúdo ótimo de betume e de filer, tem que se considerar o volume de vazios alcançado e a trabalhabilidade das amostras Marshall (Höeg, 1993).

Para definir o conteúdo final do betume é também importante considerar a precisão da dosagem de betume (em pesagem) na central betuminosa. A precisão necessária é normalmente de $\pm 0,3\%$ medido numa única amostra ou menos de $\pm 0,2\%$ em média.

A mistura com teor de betume e filer otimizado testado em provetes Marshall em laboratório deve ter um teor máximo de vazios de 2,0 %.

Após a construção do troço experimental no local da obra, o conteúdo final de betume para a produção regular pode ser avaliado com base nos resultados e, se necessário, ajustado em conformidade. Se ocorrerem alterações importantes das propriedades do material, da mistura de materiais ou das condições de pavimentação, a formulação da mistura deve ser repetida.

O conteúdo final do betume e as propriedades da mistura betuminosa para a produção regular devem satisfazer os requisitos de concepção que tenham em conta as condições reais da barragem, tais como a sua altura, os materiais de enchimento, as condições de fundação, a sismicidade do local de construção, entre outros (ICOLD, 2018).

Para barragens mais elevadas, após terminada a formulação preliminar da mistura betuminosa obtendo o teor ótimo de betume, deve ser efetuado um ensaio triaxial. Esses ensaios devem ser efetuados e avaliados por um laboratório experiente e as consequências dos resultados dos ensaios triaxiais devem estar em conformidade com as condições locais da barragem.

3.3.3 Caracterização adicional da mistura

A partir do teor ótimo de betume definido na formulação da mistura com base no ensaio Marshall, são realizados alguns ensaios de caracterização da mistura adicionais.

3.3.3.1 Ensaio Triaxial de carregamento estático

No ensaio triaxial (EN12697-25 Cyclic compression test, Método A) são preparados em laboratório provetes cilíndricos de 100 mm ou 150 mm de diâmetro e altura de 200 mm ou 300 mm. A compactação dos provetes é realizada com um compactador de impacto Marshall aplicando 30 golpes por camada. Os provetes são construídos em 4 camadas de espessura igual. Os provetes são fechados numa membrana de borracha impermeável durante o teste. As condições de ensaio normalmente utilizadas são:

- Temperatura do teste: 5, 10 ou 20°C, dependendo das condições locais e da temperatura da água no reservatório;
- Taxa de deformação: 0,03 - 0,1%/min.
- Tensão de lateral: 0,2 a 1,5 MPa

3.3.3.2 Ensaio triaxial de carregamento cíclico

O ensaio triaxial de carregamento cíclico (EN12697-25 Cyclic compression test, Método B) pode ser considerado para zonas com uma probabilidade sísmica de intensidade elevada. Este ensaio requer equipamento muito especial e pessoal altamente experiente para medir as tensões combinadas e axiais, bem como a fluência do material (ICOLD, 2018).

3.3.3.3 Ensaio de flexão

Um núcleo asfáltico deve ser suficientemente flexível e dúctil para seguir as deformações induzidas do aterro e das zonas adjacentes sem fissurar. A flexibilidade da mistura betuminosa pode ser ajustada e modificada para a deformação esperada dos espaldares da barragem e das zonas adjacentes. Isto significa que a deformação do núcleo asfáltico depende da deformação induzida do aterro. Em geral, as misturas betuminosas são muito flexíveis e a qualidade e a quantidade do betume, bem como o conteúdo dos agregados finos, influenciam a sua flexibilidade (Figura 3.4). Uma das maiores deformações que já ocorreu numa barragem ACED sem fugas foi de cerca de 2,4 m (Barragem Eberlaste, Áustria). A Figura 3.4 ilustra a flexibilidade do núcleo asfáltico da Barragem de Mogliçë na Albânia. Por outro lado, misturas betuminosas mais rígidas têm sido usadas para barragens com aterros rígidos em vários países (ICOLD, 2018).



Figura 3.4 - Exemplo da flexibilidade de um núcleo asfáltico (Barragem de Mogliçë, Albânia 2019)

Pode ser executado um ensaio de flexão de dois pontos de uma amostra prismática para determinar a flexibilidade das camadas de mistura betuminosa, verificando assim as deformações que se produzem. Trata-se de um ensaio simples e pode ser efetuado à temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ICOLD, 2018).

3.3.3.4 Avaliação da trabalhabilidade

Uma viscosidade e deformabilidade suficientemente elevadas da mistura betuminosa são propriedades importantes para garantir uma boa trabalhabilidade, especialmente para barragens em ambientes climáticos frios e húmidos. Rochas britadas devem ser utilizadas como agregados e a adição de areia ou cascalho natural na mistura betuminosa melhorará a sua trabalhabilidade.

A adição de filer de calcário como material de enchimento tem um efeito "lubrificante" e também melhorará a adesividade entre betume e agregados.

É importante assegurar que não haja sujidade, argila, matéria orgânica ou outras contaminações nos agregados e, se necessário, o material deve ser lavado (ICOLD, 2018).

3.3.3.5 Ensaio de Permeabilidade

A relação entre o índice de vazios e a permeabilidade em amostras compactadas de misturas betuminosas está bem documentada em muitos estudos e relatórios de investigação. Os ensaios de permeabilidade são bastante difíceis e demorados, enquanto as medições do índice de vazios são rápidas e fáceis. Por conseguinte, é hoje geralmente aceite que a determinação do índice de vazios tem de fazer parte das especificações técnicas e os testes de permeabilidade só têm de ser realizados se houver preocupações que assim o justifique (ICOLD, 2018).

3.4 Equipamentos

3.4.1 Central betuminosa

A mistura betuminosa para as ACEDs deve ser produzida com os mais elevados padrões de qualidade e quaisquer variações devem estar dentro das tolerâncias especificadas. Isto implica critérios rigorosos para o tipo e precisão da própria central betuminosa, para as variações das propriedades dos agregados, bem como para o controlo da temperatura relacionado com a qualidade do betume. Por outro lado, uma mistura betuminosa produzida e colocada numa estrada ou aeroporto pode facilmente ser removida em caso de uma inconformidade na produção. No entanto, a remoção e reparação do núcleo asfáltico não conforme numa ACED é consideravelmente mais problemática, se não for identificada imediatamente após a sua colocação.

Existem dois tipos principais de centrais de misturas betuminosas. As centrais descontínuas, onde os vários agregados são fracionados após a secagem, pesados e adicionados separadamente no misturador da central juntamente com o betume e o filer necessários. O outro tipo, são centrais de mistura contínua, onde os vários agregados são carregados em volume diretamente no tambor de secagem e mistura.

Nas ACEDs, a produção diária será baixa com intermitências frequentes aquando do início dos trabalhos, na parte inferior da barragem. À medida que a construção da barragem sobe, a produção será gradualmente mais contínua com o aumento da quantidade de mistura aplicada.

A central de produção descontínua deve ser especificada para ter controlo suficiente da mistura betuminosa produzida. As centrais de mistura contínua fornecem misturas betuminosas numa gama mais ampla em comparação com as centrais descontínuas e não são tão adequadas.

A mistura betuminosa para ACEDs é rica em betume, agregados finos e filer. Por conseguinte, o tempo de mistura deve ser aumentado em comparação com o tempo regular de mistura do asfalto rodoviário. As indicações de vários fabricantes de centrais betuminosas descontínuas baseiam normalmente a capacidade de produção num ciclo de mistura de 45 segundos. Para este tipo de mistura betuminosa, recomenda-se que o ciclo seja aumentado, por exemplo para 60 segundos, dependendo das condições locais. Isto poderia reduzir a capacidade de produção da central betuminosa em cerca de 33%.

Devido à quantidade muito elevada de agregados finos (aproximadamente $50\% \leq 4 \text{ mm}$), a capacidade de fracionamento na central betuminosa torna-se frequentemente um fator de produção crítico. As centrais para ACEDs devem ter uma capacidade de fracionamento mais elevada do que as utilizadas nas obras rodoviárias.

A central betuminosa deve ter a capacidade de colocar pelo menos três camadas por dia em qualquer nível da barragem. O número de horas de trabalho por dia deve ser considerado cuidadosamente, uma vez que a produção não será contínua.

A capacidade de produção do tambor de secagem depende, em grande medida, do teor de humidade nos agregados. A fração fina (menos de 4 mm) absorve especialmente uma grande quantidade de humidade se estiver desprotegida da chuva e deve ser coberta em locais onde a precipitação é frequente.

Os agregados são normalmente britados ou é usada uma mistura de areia/gravilha britada e natural. Os agregados britados devem ser preparados com um mínimo de quatro frações e carregados em silos separados. Se for adicionada areia natural, é necessário um silo adicional.

A mistura betuminosa para barragens ACED contém aproximadamente 10 - 15 % de filer (recuperado e comercial). Para extrair o filer dos agregados, a central terá de ser equipada com um filtro airbag através do qual o filer será aspirado do tambor de secagem. Um bom sistema de filtro é económico, uma vez que reduz a compra de filer, e é benéfico para o ambiente. A central deve estar equipada com dois silos para filer, um para filer recuperado e outro para filer comercial.

Os agregados são fracionados após o aquecimento no tambor de secagem. Recomenda-se que os peneiros produzam pelo menos as seguintes frações agregadas: 0/4, 4/8, 8/11 e 11/16 mm. As dimensões das frações podem variar de acordo com as normas nacionais. Uma fração adicional inferior a 2 mm conseguirá um melhor controlo de gradação da mistura betuminosa.

A seleção da unidade misturadora depende da quantidade em peso (kg) que é capaz de misturar. A capacidade de mistura por hora é um múltiplo do tamanho do misturador com o número de ciclos por hora.

Para ter uma alimentação contínua quando necessário na barragem, a central deve estar equipada com um pequeno silo de armazenamento quente para a mistura betuminosa. O silo também vai reduzir a intermitência de produção na central, reduz os resíduos e garante uma mistura betuminosa mais homogénea.

Recomenda-se uma impressão de computador para todos os componentes de cada lote produzido. Isto permite ao operador controlar todas as quantidades de cada lote e verificar se uma mistura foi defeituosa. Além disso, a precisão da central pode ser monitorizada diariamente. As centrais de misturas betuminosas modernas estão equipadas com um alarme ou um sinal de aviso para qualquer falha na pesagem (Statkraft, 2017).

Devem ser tomados procedimentos especiais de funcionamento da central em regiões frias e/ou húmidas.

3.4.2 Equipamento de pavimentação e compactação

Após vários projetos de pavimentação do núcleo asfáltico executados na China, Espanha e Alemanha com equipamentos convencionais de pavimentação, a WALO International AG (empresa Suíça) desenvolveu uma nova pavimentadora em 2015. A máquina, apresentada na Figura 3.5, combina todas as componentes importantes numa unidade compacta. O seu chassi sólido suporta um silo para a mistura betuminosa coberto e aquecido, tremonhas espaçosas para material de filtro, um dispositivo de aquecimento por infravermelhos regulável de alto desempenho e unidades de compactação pesada.



Figura 3.5 - Recente máquina de pavimentação do núcleo asfáltico da WALO (Barragem Skjerkevatn, Noruega 2016)

A pavimentadora é controlada por GPS tridimensional e, através de um conjunto de sensores e permanente gravação de dados, consegue-se efetuar um controlo de qualidade consistente, garantindo uma pavimentação de alta precisão controlada permanentemente. Em combinação com as quatro lagartas independentes, o mecanismo de direção permite seguir a linha central com precisão mesmo em barragens com eixo de curva com raio pequeno.

A combinação de ar comprimido e o dispositivo de aquecimento por infravermelhos instalado na frente da pavimentadora permite um progresso permanente da construção, mesmo em condições meteorológicas difíceis (Statkraft, 2017).

A compactação de uma ACED inclui a compactação do núcleo asfáltico e também a compactação das zonas de filtro adjacentes. Uma vez que as zonas de filtro terão um assentamento maior do que o núcleo asfáltico durante a compactação as espessuras das camadas do material colocado nas zonas de filtro também serão maiores do que a espessura da mistura betuminosa para garantir que ambas as zonas estão no mesmo nível após a compactação. A altura adicional necessária da zona de filtro deve ser controlada durante todo o processo de compactação.

A compactação nos núcleos asfálticos difere da compactação normalmente efetuada nas estradas ou nos aeroportos. Nestes, as sobreposições são geralmente finas e a mistura betuminosa contém menos finos, filler e betume. O material empregue numa barragem de núcleo asfáltico é muito mais viscoso e denso e durante o processo de compactação a mistura betuminosa é vibrada em profundidade para garantir que os agregados contidos minimizem o conteúdo de vazios para alcançar os critérios do volume de vazios.

Para além do cumprimento do volume de vazios exigido (<3 %), o núcleo asfáltico deve ter uma boa interligação com a zona de filtro adjacente mantendo a largura mínima do núcleo. A largura dos tambores do cilindro empregue no núcleo deve ser maior do que a largura do núcleo asfáltico, uma vez que a mistura betuminosa normalmente não consegue suportar o cilindro sem "afundar". O cilindro terá, por conseguinte, de funcionar parcialmente nas zonas de filtro de cada lado do núcleo para compactação do núcleo asfáltico, como apresentado na Figura 3.6. Além disso, a utilização de compactadores de percussão ou placas vibratórias portáteis também é viável para a compactação devendo a compactação final ser feita com um cilindro (Statkraft, 2017).



Figura 3.6 - Compactação final do núcleo asfáltico (Barragem Skjerkevattn, Noruega 2016)

Existe uma preocupação geral de que, se o cilindro para o núcleo for demasiado largo, todo o cilindro estará apoiado nas zonas de filtro, dando ao núcleo uma compactação e vibração insuficientes. Ao mesmo tempo, se a área de contacto na zona de filtro for demasiado pequena, a parte superior do núcleo asfáltico será pressionada para fora devido ao peso do cilindro e, assim, aumentará desnecessariamente o consumo de mistura betuminosa utilizado.

Assim, é hoje prática comum que os tambores não devem exceder a largura do núcleo asfáltico em mais de 10 a 20 cm. No entanto, isto não deve ser considerado como uma regra absoluta. Para núcleos asfálticos mais largos, a largura extra deve ser considerada juntamente com o peso do cilindro a utilizar.

Para vibrar em profundidade o núcleo asfáltico colocado, a vibração deve estar a uma alta amplitude e baixa frequência. É necessário ter cilindros com acionamento sincronizado em ambos os tambores. Também é benéfico ter cilindros com um grande diâmetro de tambor. Os cilindros com um diâmetro de tambor mais pequeno ficam presos mais facilmente e tendem a "empurrar" a mistura betuminosa para a frente em vez de se deslocar e vibrar em cima do núcleo. Para evitar que a mistura betuminosa se agarre aos tambores, será necessário que os compactadores sejam providos com um sistema de pulverização de água.

Antes do início dos trabalhos de compactação na barragem, deve ser realizada no local da obra uma secção de ensaio ou troço experimental em larga escala com a maquinaria, a mistura betuminosa e o material da zona de filtro a utilizar. Nestes trabalhos prévios pretende-se escolher o equipamento de compactação, a sequência de compactação e o número de passagens necessárias para cumprir os requisitos definidos.

Normalmente são necessárias três a cinco passagens de vibração. Aumentar o número de passagens de cilindro pode não diminuir o conteúdo de vazios, mas apenas provocar a migração do betume e filer para o topo da camada.

A zona de filtro de cada lado do núcleo asfáltico tem normalmente 1,3 a 1,5 m de largura. A utilização de cilindros vibratórios com uma largura de 1,0 – 1,2 m normalmente são suficientes para este fim. A compactação da zona de filtro depende da sua composição. Embora se deseje obter uma densidade suficientemente elevada deve-se ter cuidado para não comprimir o núcleo asfáltico de modo que a secção transversal de cada camada fique côncava e, assim, reduza a largura do núcleo abaixo do requisito mínimo (ICOLD, 2018).

Para evitar o deslocamento do núcleo asfáltico enquanto este ainda não está arrefecido, a compactação da zona de filtro deve ser efetuada com dois cilindros a trabalhar em paralelo, como ilustrado na Figura 3.7. Se estiver demasiado seco e para conseguir uma compactação suficiente, o material da zona do filtro pode ser humedecido. Neste caso, deverá ser molhado antes de o colocar na tremonha para evitar a presença de água na superfície da camada da mistura betuminosa.



Figura 3.7 - Compactação da zona de filtro (Barragem de Alpaslan II, Muş, Turquia 2019)

3.4.3 Laboratório de obra

Antes do início da aplicação do núcleo asfáltico deve ser instalado um laboratório de obra, com pessoal técnico especializado e totalmente equipado para a realização de um controlo de qualidade em obra diário e contínuo. A frequência dos ensaios será definida no caderno de encargos, mas deve ser alargada sempre que existam dúvidas sobre a qualidade obtida, quer devido a variações nos agregados, quer ao funcionamento da central betuminosa ou à qualidade do trabalho realizado durante as operações de colocação e compactação da mistura betuminosa.

No caso de alguns dos resultados diários serem não conformes, pode ser necessária a remoção da mistura betuminosa. Se esta ainda estiver quente, isso pode ser facilmente feito com uma escavadora, mas se já tiver arrefecido, a sua remoção é muito trabalhosa. Por conseguinte, os resultados diários devem estar disponíveis ao final do dia de produção e antes dos trabalhos recomeçarem no dia seguinte.

A principal preocupação ao nível da qualidade da mistura betuminosa aplicada no local é garantir que esta tenha um volume de vazios inferior a 3%. O valor real do volume de vazios *in situ* pode ser determinado principalmente por ensaio de carotes extraídos. No entanto, a carotagem do núcleo com equipamento comum normalmente é realizada a uma profundidade de aproximadamente 45 cm, geralmente incluindo duas camadas colocadas. O núcleo precisa de arrefecer durante vários dias antes que a carotagem possa ser executada com sucesso. A fim de alcançar um progresso razoável na construção, a carotagem do núcleo é apenas realizada como uma verificação pontual.

Com a experiência de hoje em ACEDs, a frequência das carotagens do núcleo depende do progresso do trabalho ou após aumentos de altura do núcleo de 5 a 10 m, desde que os resultados anteriores e outros controlos de qualidade sejam satisfatórios. No entanto, a primeira perfuração do núcleo deve ser realizada o mais tardar dentro de duas semanas após o início dos trabalhos de aplicação da mistura betuminosa. Pode ser desejável realizar a perfuração inicial do núcleo logo após o início dos trabalhos quando houver uma oportunidade para o fazer.

As medições do volume de vazios em provetes Marshall compactados no laboratório e as análises de extração dos materiais da mistura betuminosa colocada no núcleo são as principais medidas diárias de controlo da qualidade. Se estes resultados forem consistentes e bons, e se as condições climáticas e os trabalhos de aplicação forem satisfatórios, podem ser assegurados bons resultados para o volume de vazios. No entanto, se houver dúvidas sobre a qualidade alcançada, os trabalhos devem ser interrompidos imediatamente e a mistura betuminosa colocada deve ser testada e/ou removida enquanto ainda está quente (Knoop *et al*, 2018).

Os ensaios laboratoriais são efetuados em duas fases distintas. Na primeira fase, antes do início da obra, são realizados os ensaios aos agregados e betumes, incluindo a definição da mistura betuminosa. Na segunda fase, durante o período de construção, são realizados os ensaios diários para controlo de qualidade da mistura betuminosa a aplicar.

A qualidade e as variações da mistura betuminosa produzida dependem dos agregados empregues e da sua variação. Por conseguinte, os agregados produzidos devem ser regularmente amostrados e ensaiados durante a produção. A curva granulométrica e o achatamento vão variar com o grau de desgaste dos trituradores e também caso os ensaios sejam efetuados em condições secas ou com chuva. Os agregados devem ser armazenados separadamente e de forma a minimizar a segregação.

O tipo e os requisitos do betume a utilizar devem ser definidos nas especificações técnicas. O fornecedor ou produtor de betume realizará normalmente controlos regulares da qualidade dos betumes que tem disponíveis, os quais devem ser disponibilizados a cada entrega de betume na central. No laboratório de obra, em cada entrega do fornecedor deve ser verificado o certificado de qualidade devendo ser realizados ensaios de penetração e de anel e bola de forma a confirmar a qualidade do betume entregue.

A composição da mistura betuminosa deve ser controlada pelo menos uma vez por dia e os ensaios complementares dependerão igualmente da quantidade produzida por dia. As análises da extração devem incluir a granulometria da mistura dos agregados e o conteúdo de betume.

Quanto à mistura betuminosa produzida, esta deve ser avaliada diariamente através de ensaios de compactação e de medição do volume de vazios dos provetes Marshall compactados em laboratório de amostras recolhidas diretamente na central.

A compactação dos provetes Marshall no laboratório (número de golpes) deve ser efetuada de modo que o grau de compactação final corresponda à compactação do núcleo asfáltico na barragem. A temperatura da compactação deve corresponder à do tipo de betume.

Capítulo 4 - Controlo de qualidade da construção do núcleo asfáltico – caso de estudo

4.1 Introdução

O presente capítulo inicia com a descrição do enquadramento geral da obra. Seguidamente, descreve-se o estudo inicial realizado, incluindo a caracterização dos materiais (agregados e betume) assim como a formulação e caracterização da mistura betuminosa para o núcleo asfáltico. Apresenta-se a sequência da construção dos trechos experimentais e dos resultados obtidos. Finaliza-se este capítulo com a apresentação da metodologia utilizada na gestão da qualidade durante a produção e construção do núcleo asfáltico da barragem de Mogliçë, na Albânia.

4.2 Enquadramento da obra

A barragem de Mogliçë foi construída no rio Devoll no sudeste da Albânia, esta localiza-se nos distritos de Korçë e Elbasan, nos municípios de Maliq, Korçë e Gramsh apresentados na Figura 4.1.

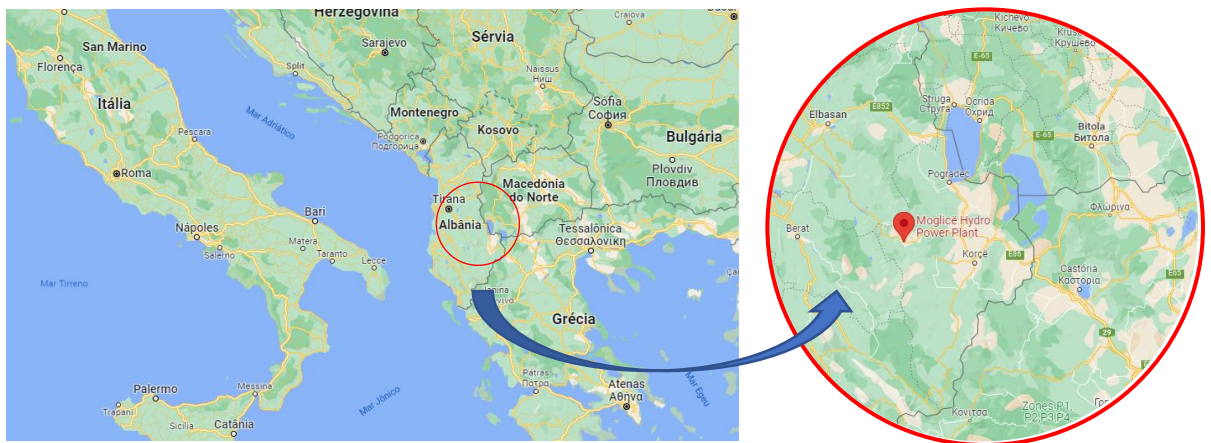


Figura 4.1 - Localização da obra (Google Maps)

Por a obra estar localizada numa zona de elevado risco sísmico, optou-se pela utilização de 2 tipos de betume, o B70/100 e o B160/220 sendo o primeiro utilizado até aos 83,85m de altura e cota 580,35m do núcleo asfáltico e o restante foi concluído com o B160/220. Nas Figuras 4.2 e 4.3 apresentam-se a secção transversal através do eixo da barragem e a secção transversal através do perfil do núcleo asfáltico, respetivamente.

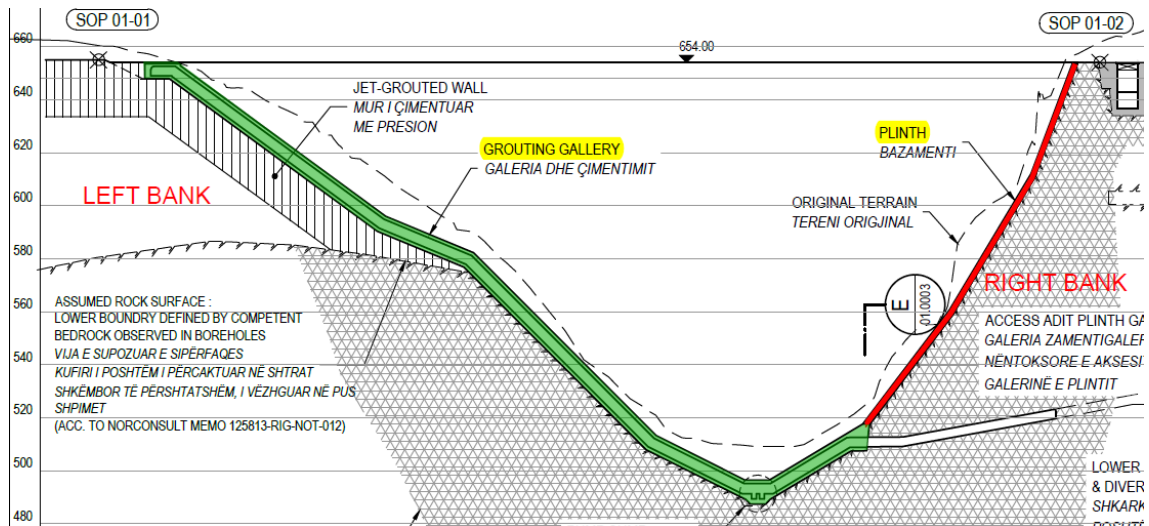


Figura 4.2 - Secção Transversal através do Eixo da Barragem (Statkraft, 2017)

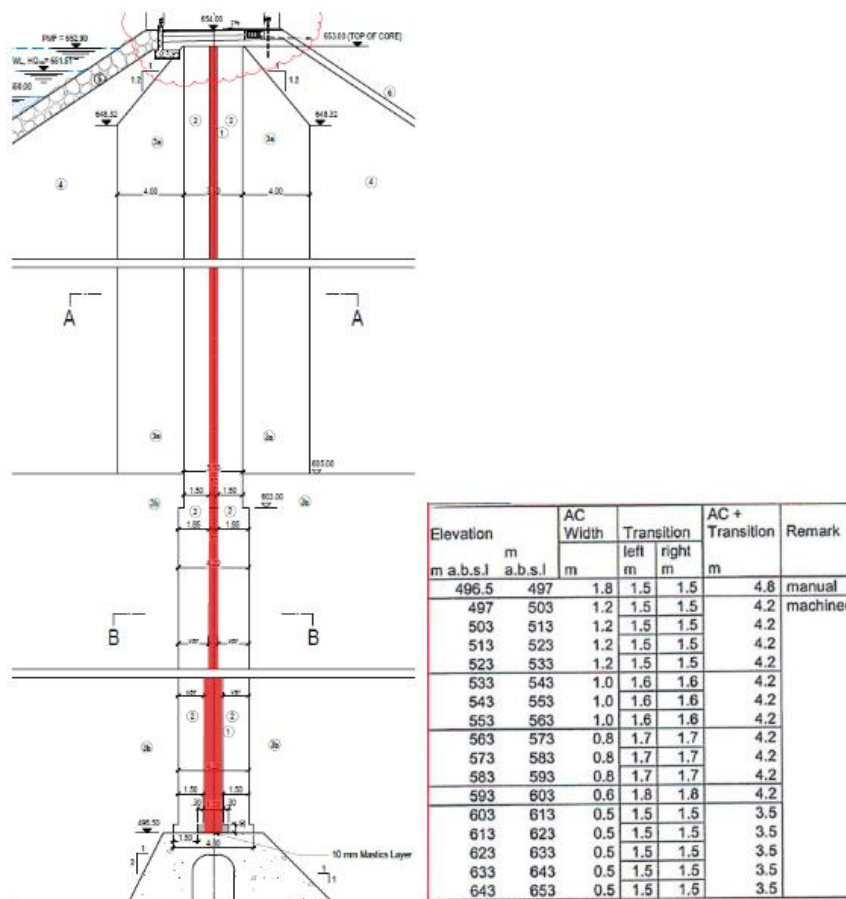


Figura 4.3 - Secção Transversal através do Perfil do Núcleo Asfáltico (Statkraft, 2017)

4.3 Ensaios laboratoriais

O estudo que se apresenta nesta secção tem como objetivo descrever e caracterizar os materiais utilizados nas misturas betuminosas, tal como as propriedades fundamentais e os respetivos ensaios de formulação até à sua composição final. Posteriormente, apresentam-se os ensaios de caracterização das misturas betuminosas.

4.3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas são agregados naturais, filler e ligante betuminoso tradicional. Apresentam-se nas seguintes subsecções as características de cada material.

4.3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados são calcários britados no local da obra. O calcário é uma rocha sedimentar composta em grande parte pelos minerais calcite. Estes materiais foram fornecidos pela empresa Limak – AGE JV, apresentando diferentes tipologias: Agregados britados: #16/22, #11/16, #8/11, #4/8; areia britada #0/4 e areia natural 0/4. Na Tabela 4.1 são apresentadas as granulometrias dos agregados, realizadas de acordo com a norma EN 933-1.

Tabela 4.1 - Granulometrias dos agregados

Peneiros [mm]	Agregados (passados por peso) [m%]					
	# 16/22	# 11/16	# 8/11	# 4/8	# 0/4	Ø 0/4
31,5	100,0					
22,4	98,5	100,0				
16,0	17,2	97,4	100,0			
11,2	0,7	18,7	94,7	100,0		
8,0	0,6	0,4	5,4	98,0		
5,6	0,5	0,4	0,3	38,9	100,0	100,0
4,0	0,5	0,4	0,3	1,7	97,0	94,6
2,0	0,5	0,4	0,3	0,5	73,3	72,6
1,0	0,4	0,4	0,3	0,5	49,7	47,9
0,5	0,4	0,4	0,3	0,5	32,4	26,2
0,25	0,4	0,3	0,3	0,5	20,1	11,3
0,125	0,3	0,3	0,3	0,5	13,9	4,3
0,063	0,3	0,2	0,2	0,5	10,4	2,3

A determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados foi realizada de acordo com a norma EN 1097-6 apresentando-se os resultados na Tabela 4.2.

Na caracterização dos agregados determinou-se ainda o Índice de achatamento de acordo com a norma EN 933-3 e a percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos de acordo com a norma EN 933-5, apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4, respetivamente.

Tabela 4.2 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados

Agregados	Densidade [Mg/m ³]	Absorção WA24 [%]
Ø 0/4	2,744	1,4
# 0/4	2,723	0,5
# 4/8	2,716	0,4
# 8/11	2,714	0,4
# 11/16	2,720	0,5
# 16/22	2,719	0,4

Tabela 4.3 - Índice de achatamento dos agregados

Agregados	Índice de achatamento FI
# 4/8	5
# 8/11	5
# 11/16	4
# 16/22	4

Tabela 4.4 - Percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos

Agregados # 4/10 to 8/14 #				Denominação	
C _{cr}	100	M.%	C _{tr}	100	M.%
C _r	o	M.%	C _{tr}	o	M.%
C 100/0					

Uma das características mais importantes no que toca à durabilidade das misturas betuminosas é a avaliação da afinidade entre betume e agregados, que se realizou de acordo com a norma Suíça SN 671 411. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.5 e são ilustrados pela Figura 4.4. Desta avaliação pode verificar-se um recobrimento de 90% da superfície dos agregados.

Tabela 4.5 - Afinidade entre betume e agregados

Agregados	Grau de recobrimento [%] B70/100
# 8/11	90



Figura 4.4 - Grau de recobrimento dos agregados

4.3.1.2 Filler comercial

O filler comercial é de origem calcária. A sua granulometria apresenta-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Granulometria do filler calcário

Peneiros [mm]	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6
Filler comercial	72,4	89,8	96,6	98,6	99,4	99,8	100	100

Outros ensaios de caracterização foram efetuados, como o ensaio Delta anel e bola de acordo com a norma EN 13179-1, o volume de vazios determinado pelo Rigden de acordo e a massa volúmica determinada de acordo com a norma EN 1097-7 com a norma EN 1097-4, apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Ensaio de caracterização do filler

Ensaio	Norma	Valor obtido
Delta anel & bola [°C]	EN 13179-1	13,5
Volume de vazios no Rigden [%Vol.]	EN 1097-4	33
Massa volúmica [Mg/m ³]	EN 1097-7	2,712

4.3.1.3 Betume

Os ligantes betuminosos oferecem propriedades de coesão, flexibilidade e estabilidade às misturas e são essenciais na sua composição. As misturas betuminosas foram produzidas com betume asfáltico 70/100, da refinaria ARMO UPN FIERI, Fier, Albânia e era fornecido pela empresa TPD – Trading Petrol & Drilling. Para este betume foram realizados vários ensaios de caracterização apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Ensaio de caracterização do betume

Betume	Norma	B 70/100
Penetração 25 °C, 100g, 5 seg. (0,1 mm)	EN 1426	85
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	45,6
Índice de penetração	EN 12591	-1,1

4.3.2 Formulação da mistura betuminosa

A determinação da composição das misturas betuminosas tem por base a granulometria dos agregados, segundo os fusos granulométricos presentes nas especificações, e a percentagem ótima de ligante. Com os materiais anteriormente caracterizados foi então realizado o estudo para a obtenção da mistura betuminosa densa (Dense Asphalt Concret Layer - DACL) com as características desejadas. Na Tabela 4.9 apresentam-se as percentagens dos agregados adotados para a DACL.

Tabela 4.9 - Composição de agregados da DACL

Agregado Mineral	Fração [mm]	Receita [% m.]
Pedra britada	# 11/16	14
Pedra britada	# 8/11	9
Pedra britada	# 4/8	18
Areia britada	#0/4	35
Areia natural	Ø 0/4	12
Filler de importação		12
Total de agregados		100

Na Figura 4.5 apresenta-se a curva granulométrica da mistura de agregados assim como a representação do fuso granulométrico.

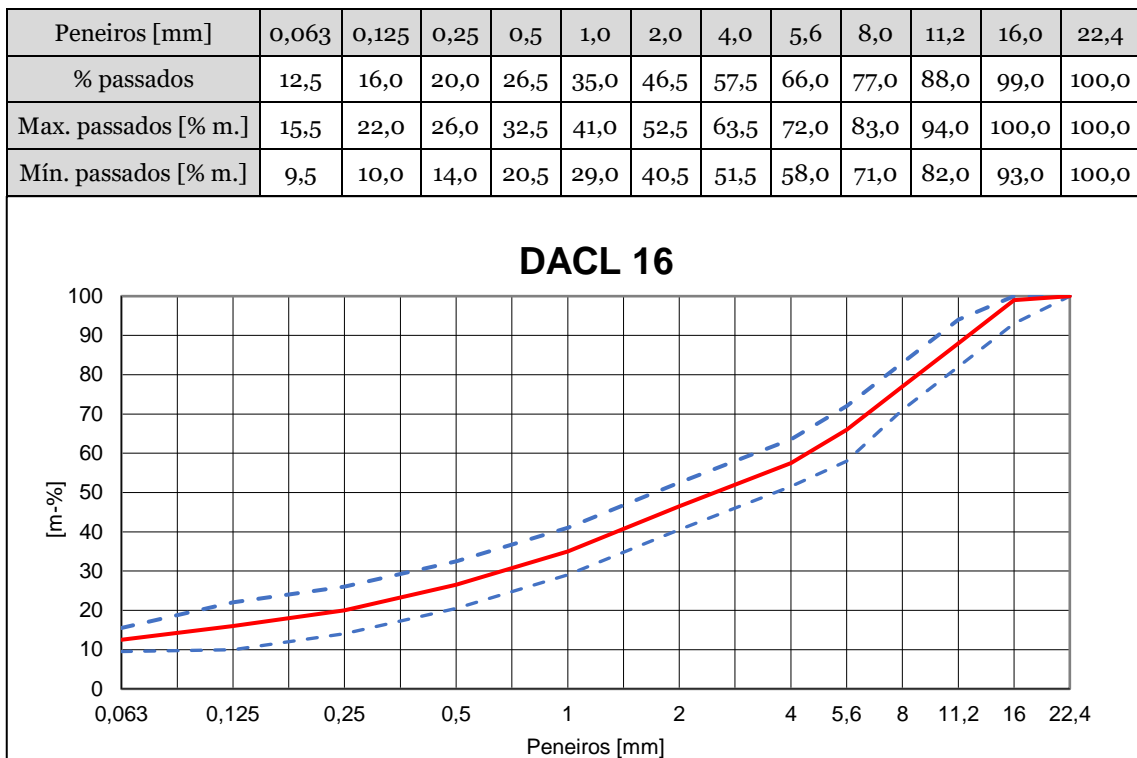


Figura 4.5 - Curva granulométrica da mistura de agregados

Com esta composição produziram-se 5 misturas com diferentes teores em betume. Estas foram compactadas em moldes Marshall, com 101.6 mm de diâmetro e altura variável, de acordo com a norma EN 12697-35, com uma temperatura de compactação de 135°C. A compactação dos provetes realizou-se com o compactador de impacto, aplicando 30 pancadas em cada face dos provetes.

A baridade máxima teórica foi obtida através do método volumétrico, presente na norma EN 12697-5 (Procedimento A). A baridade dos provetes determinou-se segundo a norma EN 12697-6. Para as misturas densas seguiu-se o Procedimento B (baridade saturada com superfície seca). A porosidade, os vazios na mistura de agregados (VMA) e os Vazios preenchidos com betume (VFB) foram calculados por meio do método matemático, segundo a norma EN 12697-8. A estabilidade e a deformação Marshall foram determinadas a partir da realização do ensaio Marshall de acordo com a norma EN 12697-34, com uma temperatura de ensaio 40°C. Todos os resultados são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resultados do estudo inicial

Dosagem de Betume		[% m.]	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75
Conteúdo de Betume		[% m.]	5,78	5,99	6,27	6,53	6,76
Baridade máxima teórica		[Mg/m ³]	2,486	2,477	2,467	2,459	2,451
Baridade aparente		[Mg/m ³]	2,456	2,450	2,442	2,436	2,430
Volume de vazios	VM	[%Vol.]	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9
Estabilidade Marshall	SM	[kN]	13,1	11,8	10,4	9,8	9,5
Deformação Marshall	FM	[mm]	4,9	5,8	6,2	6,5	6,8
Vazios da mistura de agregados	VMA	[%Vol.]	15,1	15,4	16,0	16,5	16,9
Vazios preenchidos com betume	VFB	[%]	92,0	92,9	93,6	94,3	94,9

Tendo em conta os resultados obtidos nas várias misturas realizadas e os requisitos apresentados na Tabela 4.11, definidos segundo EAAW 2008, tecem-se os seguintes comentários relativos à escolha do teor de betume.

Todas as variantes da mistura deram resultados satisfatórios no que diz respeito aos requisitos, tendo a escolha final do teor de betume sido baseada na conjugação de critérios económicos e valor médio.

Tabela 4.11 - Requisitos para misturas betuminosas densas (EAAW 2008)

		0/16
Teor em Betume	[% m.]	5,5 - 7,5
Proporção de grãos > 2 mm	[% m.]	45 - 65
Proporção de Filler ≤ 0,063 mm	[% m.]	9 - 14
Volume de vazios	[%Vol.]	max. 3,0

Assim, e após a realização deste estudo, foi proposta uma mistura com um teor de betume de 6.2% de betume B 70/100. A caracterização desta mistura é apresentada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Propriedades da mistura betuminosas selecionada

Dosagem de Betume		[% m.]	6.2
Baridade máxima teórica		[kg/m ³]	2470
Baridade		[kg/m ³]	2446
Volume de vazios	VM	[%Vol.]	1,0
Vazios preenchidos com betume	VFB	[%]	93,8
Estabilidade Marshall	SM	[kN]	~11,0
Deformação Marshall	FM	[mm]	~6,0

4.3.3 Caracterização da mistura betuminosa

O comportamento das misturas betuminosas é determinado em função dos principais ensaios de caracterização tendo em conta a formulação efetuada anteriormente. Estes ensaios, realizados em laboratório, dizem respeito ao ensaio de sensibilidade à água e ensaio triaxial.

4.3.3.1 Sensibilidade à água

A avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é importante porque está diretamente relacionada com o desempenho e durabilidade das misturas durante o tempo de vida do núcleo asfáltico. O ensaio de sensibilidade à água foi realizado segundo as normas EN 12697-12 e EN 12697-23. Os dois grupos de provetes a ensaiar (secos e imersos) foram divididos consoante a proximidade entre baridades médias. O ensaio foi efetuado a uma temperatura de 25°C, tanto para os provetes imersos (num banho de água a 25°C, 2 h antes do início) como para os provetes secos. Os resultados da média de três provetes, apresentam-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água (6.2% de betume)

		Média	
		Húmido	Seco
Diâmetro	[mm]	101,6	101,7
Espessura	[mm]	63,2	63,2
Baridade aparente	[Mg/m ³]	2,424	2,425
Resistência à tração indireta, ITS	[kPa]	527	550
Índice de resistência conservada, ITSR	[%]	95,8	

Segundo a norma EN 12697-23, deve efetuar-se uma classificação do tipo de rotura com base na observação visual dos provetes após o ensaio. Neste estudo verificou-se que nos provetes foi possível detetar roturas do tipo B (deformação), em que não é possível ver uma linha de rotura bem definida. Em qualquer um dos provetes ensaiados não se verificaram deficiências no revestimento de betume na superfície do agregado exposto nem a presença de agregado fraturado ou esmagado, apresentando apenas a rotura e a ligeira deformação dos provetes.

4.3.3.2 Permeabilidade sob pressão

A determinação da permeabilidade de um provete de mistura betuminosa faz-se seguindo um procedimento semelhante ao da determinação do coeficiente de permeabilidade do betão. A percolação da água pelo provete colocado na câmara de pressão ocorre através da aplicação de pressão suficiente para forçar a percolação pela superfície exposta do provete ensaiado, representada na Figura 4.6. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.14.

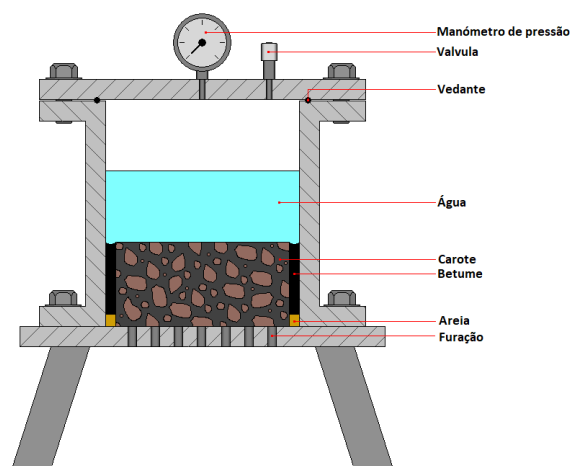


Figura 4.6 - Representação esquemática da câmara de pressão para a determinação da permeabilidade

Tabela 4.14 - Resultados da permeabilidade sob pressão

Pressão [kPa]	Tempo [h]	Avaliação
100	18	Impermeável
200	24	Impermeável
300	24	Impermeável
400	24	Impermeável
500	120	Impermeável

Apos várias reuniões com as diversas equipas de trabalho (donos de obra, consultores e construtor), em 31 de janeiro de 2017 em Oslo na Noruega foi proposta para a mesma mistura de agregados, uma dosagem de 7.0% de betume, e onde se obtiveram os resultados resumidos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Propriedades da mistura betuminosas final

Dosagem de Betume	[% m.]	7,00
Baridade máxima teórica	[Mg/m ³]	2,448
Baridade aparente	[Mg/m ³]	2,422
Volume de vazios	VM [%Vol.]	1,1
Vazios preenchidos com betume	VFB [%]	93,9
Estabilidade Marshall	SM [kN]	~9,0
Deformação Marshall	FM [mm]	~9,0

Na Tabela 4.16 apresentam-se os valores do ensaio de sensibilidade à água para esta mistura betuminosa final, com 7,0% de betume. A rotura dos provetes foi também do tipo B (deformação).

Apresentam-se também na Tabela 4.17 os resultados da permeabilidade obtidos na mistura DACL 16 com 7,0% de betume.

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água (7,0% de betume)

		Média	
		Húmido	Seco
Diâmetro	[mm]	101,8	101,8
Espessura	[mm]	62,9	62,9
Baridade aparente	[Mg/m ³]	2,436	2,432
resistência à tração indireta	[kPa]	470	476
Índice de resistência conservada	[%]	98,7	

Tabela 4.17 - Resultados da permeabilidade (7,0% de betume)

Pressão [kPa]	Tempo [h]	Avaliação
100	18	Impermeável
200	24	Impermeável
300	24	Impermeável
400	24	Impermeável
500	24	Impermeável
1000	24	Impermeável
1500	72	Impermeável
2000	168	Impermeável

Conforme o proposto pelo dono de obra e o projetista, acima da cota +580m será alterado o tipo de betume de B70/100 para B160/220. Neste estudo foram utilizados os mesmos materiais, a mesma composição da mistura de agregados, a única alteração em relação ao estudo com o betume B70/100 foi que este foi elaborado com 7.0% e 7.2% de betume B160/220.

4.3.3.3 Ensaio Triaxial

Foram realizados ensaios de compressão triaxial a pedido do dono de obra às misturas finalmente propostas com aplicação de carga isotrópica de 500 kPa, o provete foi axialmente carregado com uma taxa de tensão (esforço) de 2 % /h a uma tensão máxima de, pelo menos, 35 %. O teste triaxial foi realizado com uma célula equipada com tubos de cobre. Isto permitiu arrefecer a água da célula a 10 °C. Na Tabela 4.18 apresentam-se as baridades dos provetes e nas Figuras 4.7 e 4.8 os resultados do ensaio triaxial tensão/deformação e deformação axial/deformação volumétrica, respetivamente.

Tabela 4.18 - Baridades das misturas com diferentes teores de betume

Betume	Provete 1		Provete 2		Provete 3		D
	N.º	[Mg/m³]	N.º	[Mg/m³]	N.º	[Mg/m³]	[Mg/m³]
B70/100 6,20% M.-%	47902	2,45	47903	2,46	47904	2,45	0,01
B70/100 7,00% M.-%	47907	2,43	47908	2,43	47909	2,44	0,01
B160/220 7,00% M.-%	47911	2,38	47912	2,41	47913	2,41	0,03
B160/220 7,20% M.-%	47914	2,39	47915	2,41	47916	2,38	0,03

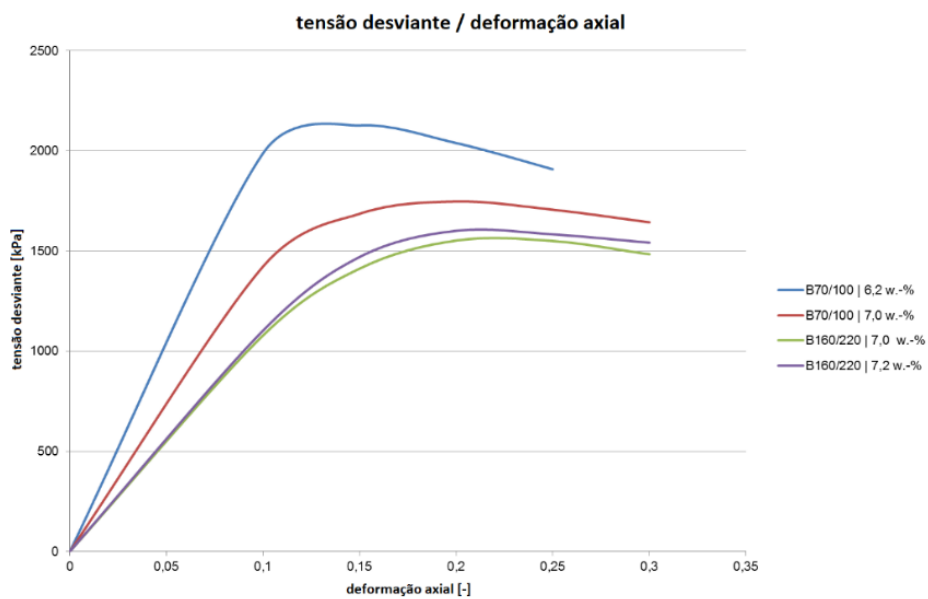


Figura 4.7 – Gráfico ensaio triaxial tensão/deformação

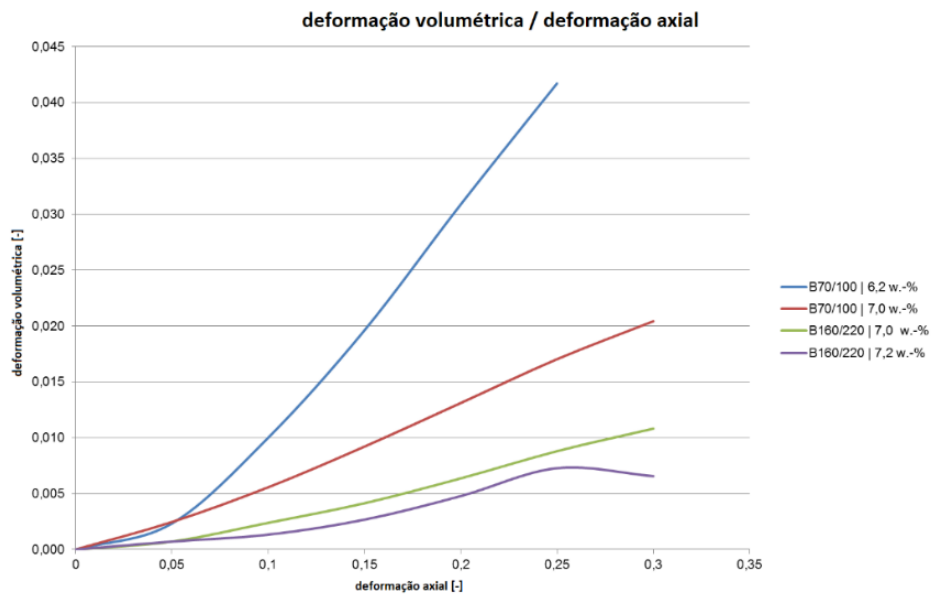


Figura 4.8 – Gráfico ensaio triaxial deformação axial/deformação volumétrica

Globalmente, devem ser observadas as seguintes conclusões:

- A composição da 1ª mistura (B70/100 | 6,2% - linha azul nas Figuras 25 e 26) é muito mais rígida e menos flexível do que os outros. No entanto, a sua estabilidade é maior;
- As misturas com um B160/220 mostram um comportamento mais flexível. No entanto, isto está relacionado com uma perda de estabilidade e resistência;
- As misturas com um B160/220 tendem a mostrar segregação de betume e são mais dispersas do que as que têm um B70/100. Já durante o processo de produção e compactação dos provetes foi difícil evitar este fenómeno. Como isto resulta num arrefecimento mais lento, terá de verificar-se nos trechos experimentais a possibilidade da construção de três camadas por dia;
- Além disso, os módulos de Young são diferentes em todas as séries e a resistência geral também é diferente. No entanto, especialmente a mudança de 7,0% de betume B160/220 para 7,2% de betume B160/220 não parece ter um impacto considerável como se pode verificar na Figura 25 e 26.

4.3.4 Trecho experimental

Nesta obra foram realizados dois trechos experimentais, um para a mistura DACL 16 com betume B70/100 e outro para a mesma mistura, mas com o betume B160/220.

Neste ponto apresentam-se só os trabalhos realizados durante o secção experimental do núcleo asfáltico com betume B160/220, pois os trabalhos realizados são os mesmos para ambos os trechos experimentais.

Nesta secção estão incluídas informações relativas aos materiais, metodologia de aplicação, testes e resultados obtidos.

Na construção do trecho experimental foram colocadas à mão duas camadas de mistura betuminosa DAC 16 de 70 cm de largura e 25 cm de espessura, seguindo-se a colocação com a máquina de três camadas de 70 cm de largura e 22 cm de espessura.

4.3.4.1 Construção do trecho experimental à mão

A colocação e a compactação do trecho experimental foram realizadas com duas camadas de 25 cm de espessura e 70 cm de largura colocadas à mão, utilizando-se uma cofragem de chapas de aço e compactadas por cilindro do tipo CAT CB32, com tambores de 130 cm de largura. Todos os procedimentos levados a cabo na construção do trecho experimental à mão encontram-se ilustrados na Figura 4.9.



Figura 4.9 - Construção do trecho experimental à mão: a) Colocação do filtro ao redor da cofragem; b) Controlo de temperatura da mistura antes de aplicada; c) Verificação das espessuras d) Colocação da mistura dentro da cofragem; e) Remoção da cofragem; f) Compactação do núcleo asfáltico

4.3.4.2 Ensaios realizados

Através de uma amostra recolhida no local, compactaram-se em laboratório vários provetes que posteriormente foram ensaiados, tendo sido realizados vários ensaios, nomeadamente, determinação do conteúdo de betume, da baridade máxima teórica e baridade aparente e do volume de vazios da mistura compactada. Os resultados obtidos a partir da amostra colhida são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Resultados da amostra do trecho experimental

Ensaio	Resultados
Conteúdo de betume [%]	6.7
Baridade máxima teórica [Mg/m ³]	2.451
Baridade aparente [Mg/m ³]	2.436
Volume de vazios [%]	0.6

Após 2 dias três carotes foram perfurados nas duas camadas colocadas à mão, como se apresenta na Figura 4.10, tendo sido realizados os ensaios de baridade aparente e volume de vazios. Os resultados obtidos a partir da dos carotes são apresentados na Tabela 4.20.



Figura 4.10 - Extração de carotes no trecho experimental à mão

Tabela 4.20 - Resultados dos ensaios aos carotes do trecho experimental à mão

Ensaio	Resultados médios dos testes		
	Carote N° 1	Carote N° 2	Carote N° 3
Baridade máxima teórica [Mg/m ³]	2.451		
Baridade aparente [Mg/m ³]	2.403	2.400	2.400
Volume de vazios [%]	1.9	2.1	2.1

4.3.4.3 Controlo da espessura da camada após compactação

Alguns dias depois da colocação das camadas foi feito um controlo da sua espessura como ilustrado na Figura 4.11. O filtro foi removido em ambos os lados das camadas pavimentadas permitindo a observação do núcleo e a medição das suas espessuras. A espessura média verificada em ambas as camadas foi de 23 cm. Notou-se o alargamento da parte superior da camada em 10 cm de ambos os lados, como representado no esquema da Figura 4.12.



Figura 4.11 - Controlo da espessura e forma das camadas



Figura 4.12 - Esquema transversal da forma das camadas

4.3.4.4 Construção do trecho experimental com a máquina

A construção do trecho com máquina foi realizada com a aplicação de três camadas de 22 cm de espessura. O trecho experimental tem um comprimento de 15m e o núcleo asfáltico uma largura de 70 cm como apresentado esquematicamente na Figura 4.13. Foi utilizado como material de filtro a gravilha natural 0-63mm no corpo da barragem. Uma escavadora foi usada para carregar a mistura betuminosa e o filtro. Um cilindro CAT CB24B com uma largura do tambor de 120 cm foi usado para compactação do filtro e do núcleo asfáltico. Todos os procedimentos levados a cabo na construção do trecho experimental com máquina encontram-se ilustrados na Figura 4.14.

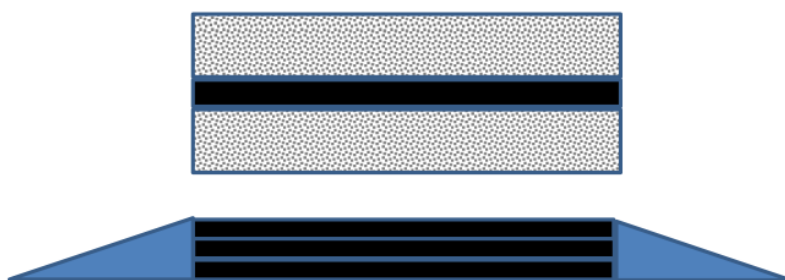


Figura 4.13 - Esquema da seção experimental

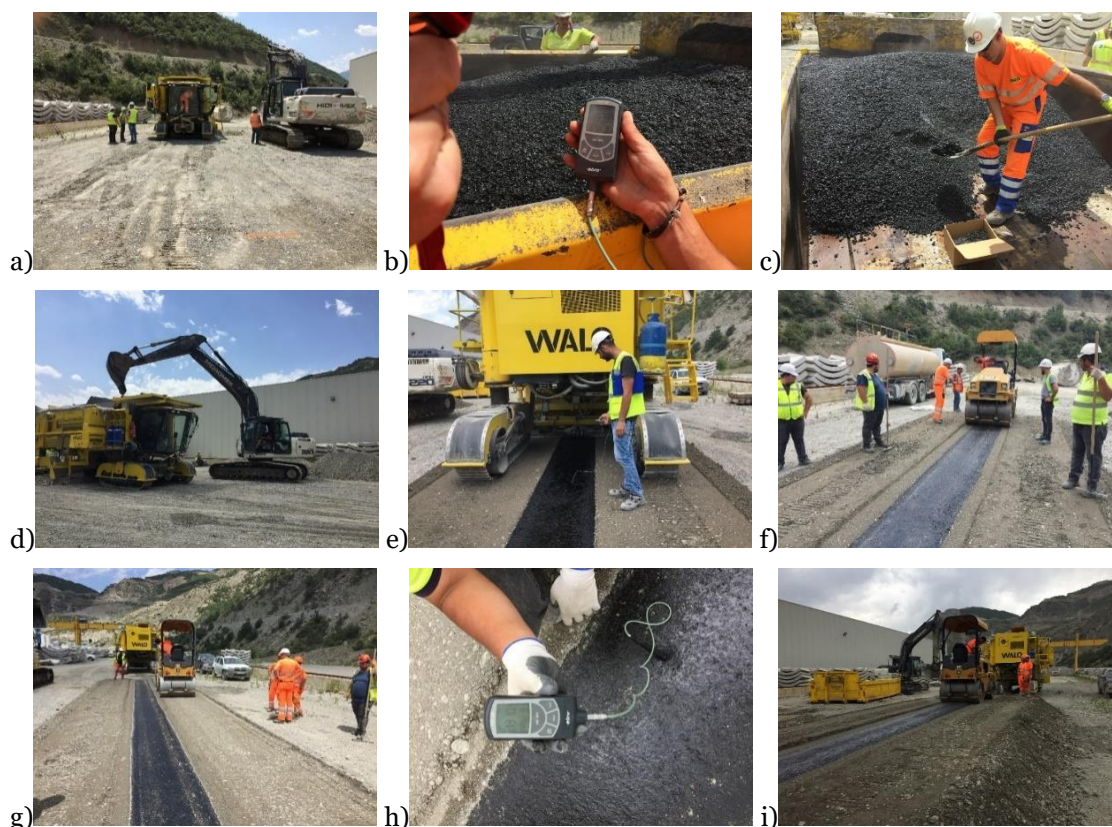


Figura 4.14 - Construção do trecho experimental com máquina: a) Local de construção; b) Controlo da temperatura da mistura antes de aplicada; c) Recolha de amostra para o laboratório; d) Carregamento dos silos da máquina; e) Aplicação simultânea do núcleo asfáltico e respetivo filtro; f) Compactação do núcleo asfáltico; g) Compactação do filtro; h) Controlo da temperatura do núcleo; i) Finalização do trecho experimental

Através de uma amostra recolhida no local, compactaram-se em laboratório vários provetes que posteriormente foram ensaiados, tendo sido realizados vários ensaios, nomeadamente, determinação do conteúdo de betume, da baridade máxima teórica e baridade aparente e do volume de vazios da mistura compactada. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Ensaio à amostra do trecho experimental com máquina

Ensaio	Resultados
Conteúdo de betume [%]	6.6
Baridade máxima teórica [Mg/m ³]	2.463
Baridade aparente [Mg/m ³]	2.425
Volume de vazios [%]	1.5

Após 2 dias três carotes foram perfurados apanhando as três camadas colocadas com a máquina, como ilustrado na Figura 4.15. A partir dos carotes extraídos foram cortados provetes, ilustrados na Figura 4.16, para a realização dos ensaios baridade aparente e volume de vazios apresentados na Tabela 4.22.



Figura 4.15 - Extração de carotes no trecho experimental com máquina



Figura 4.16 - Provetes para realização de ensaios

Tabela 4.22 - Ensaio aos carotes do trecho experimental com máquina

Ensaio	Resultados médios dos testes		
	Carote N° 1	Carote N° 2	Carote N° 3
Baridade máxima teórica [Mg/m ³]	2.463		
Baridade aparente [Mg/m ³]	2.413	2.410	2.410
Volume de vazios [%]	2.0	2.1	2.1

4.4 Gestão da qualidade durante a construção

4.4.1 Agregados, filer e betume

Foram realizadas análises granulométricas semanalmente para controlo de qualidade. De maio de 2017 até fevereiro de 2019 foram controladas 278 amostras de agregados e 114 amostras de filer. Na Figura 4.17 apresentam-se as curvas granulométricas tipo de cada agregado utilizado assim como do filer comercial.

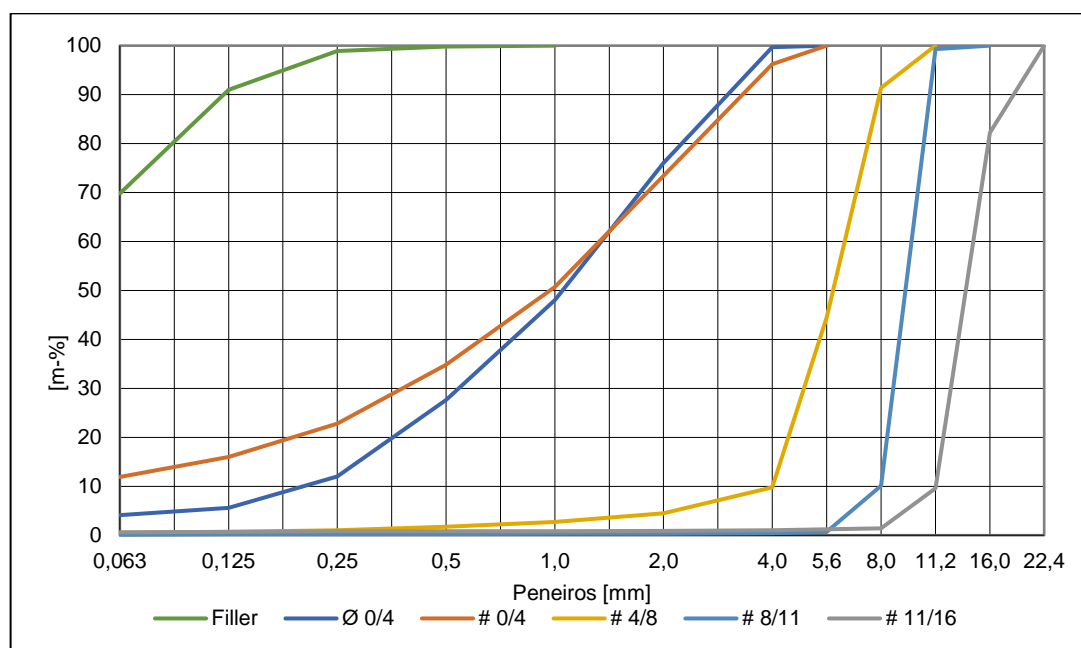


Figura 4.17 - Curvas granulométricas tipo

Quanto ao betume, sempre que era feita uma entrega era realizada a sua caracterização, através do ensaio de penetração e do ensaio de anel e bola. Todos os betumes entregues estavam em conformidade com os requisitos definidos. Foram controladas 57 amostras de B70/100 e 44 amostras de B160/220. A título exemplificativo, na Tabela 23 apresentam-se os resultados destes ensaios para 2 amostras dos betumes B70/100 e B160/220.

Tabela 4.23 - Caracterização dos betumes B70/100 e B160/220

Betume	Norma	B 70/100	B 160/220
Penetração 25 °C, 100g, 5 seg. (0,1 mm)	EN 1426	78,6	180,5
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	47,5	39,6
Índice de penetração	EN 12591	-0,75	-0,68

4.4.2 Mistura betuminosa produzida em central

As amostras da mistura betuminosa foram colhidas à saída da central ou à chegada à obra, de modo a aferir uma possível segregação após o transporte. É necessário um elevado grau de precisão para a colheita e preparação das amostras laboratoriais e o pessoal deve ter experiência prévia ou a formação necessária.

A fim de reduzir a frequência da carotagem do núcleo, determinou-se efetuar ensaios diários de compactação e as medições do volume de vazios dos provetes Marshall compactados em laboratório com amostras de misturas betuminosas recolhidas diretamente na central.

Nesta obra foram recolhidas e analisadas 483 amostras de mistura betuminosa DACL 16 sendo 265 amostras com betume B70/100 e 218 com betume B160/220. Apresentam-se nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 os resultados do ano de 2017 que correspondem à mistura DACL 16 com o betume B70/100 relativos à granulometria, teor de betume, volume de vazios e percentagem de filler, respetivamente.

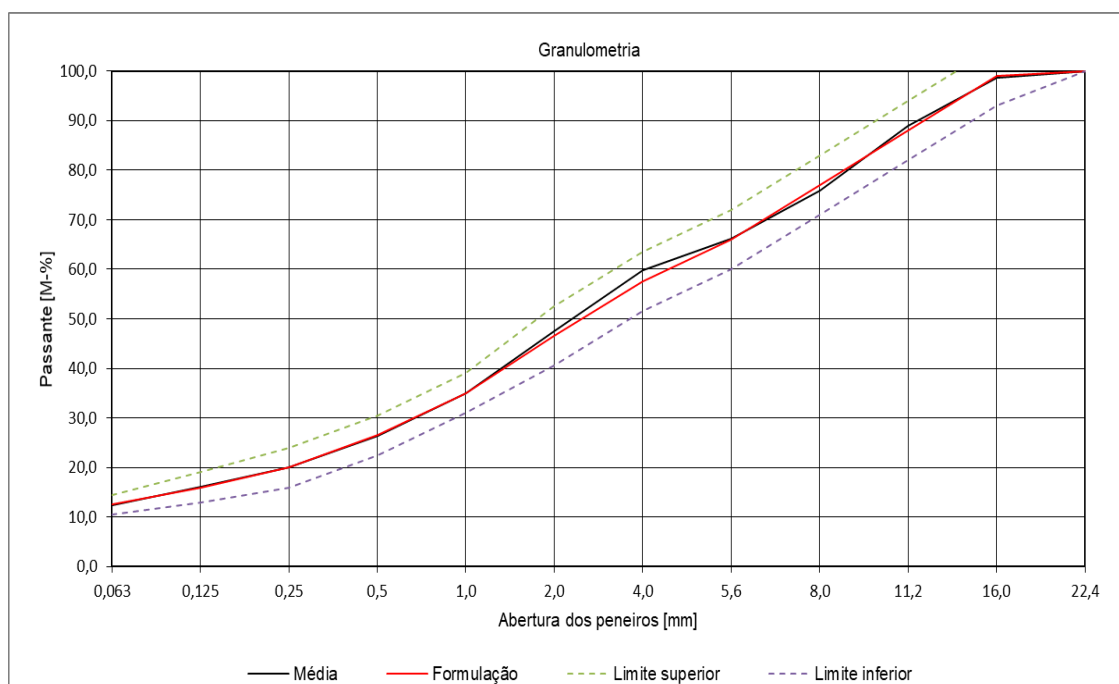


Figura 4.18 - Granulometria DACL 16 B70/100 – 2017

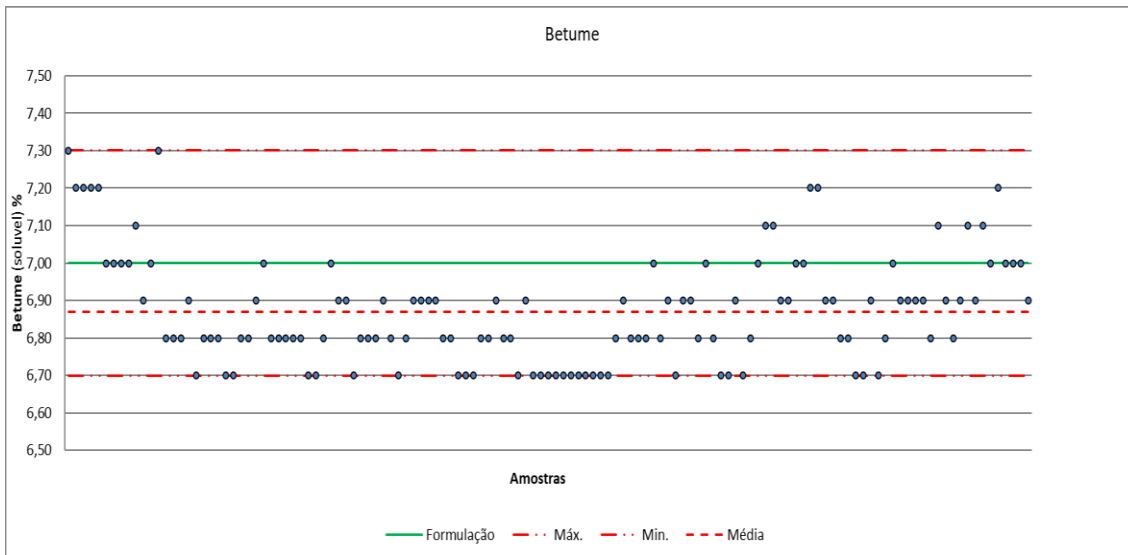


Figura 4.19 - Teor em betume DA CL 16 B70/100 - 2017

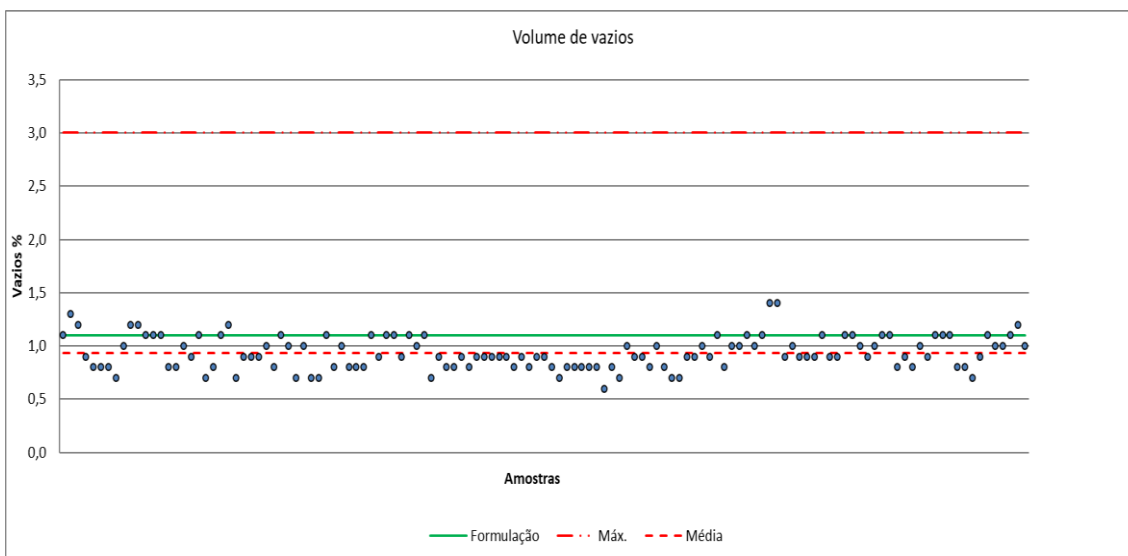


Figura 4.20 - Volume de vazios DA CL 16 B70/100 - 2017

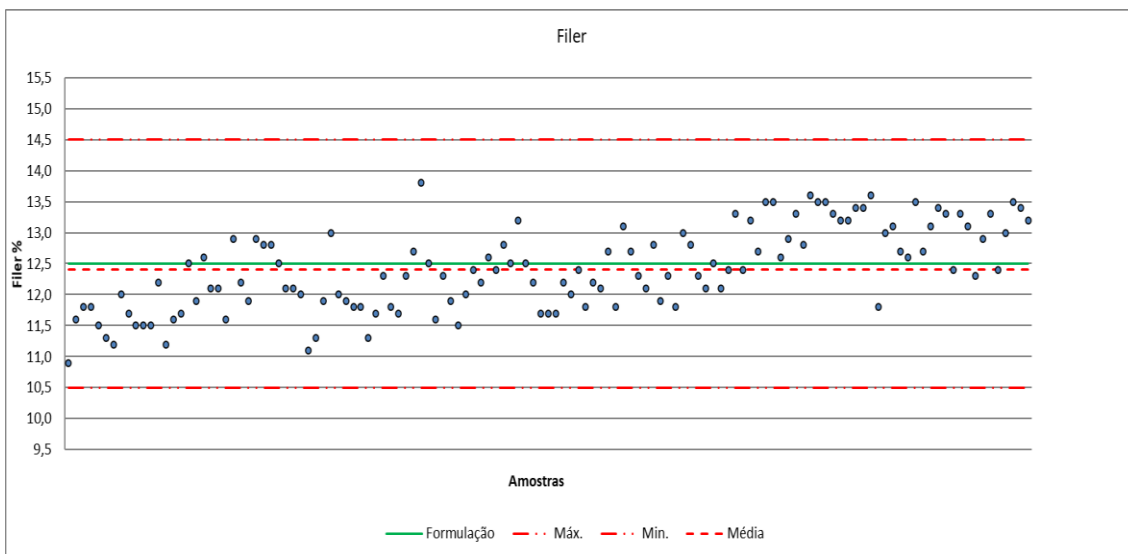


Figura 4.21 - Percentagem de filer DA CL 16 B70/100 - 2017

Apresentam-se nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 os resultados do ano de 2018 que correspondem à mistura DACL 16 com o betume B70/100 relativos à granulometria, teor de betume, volume de vazios e percentagem de filer, respetivamente.

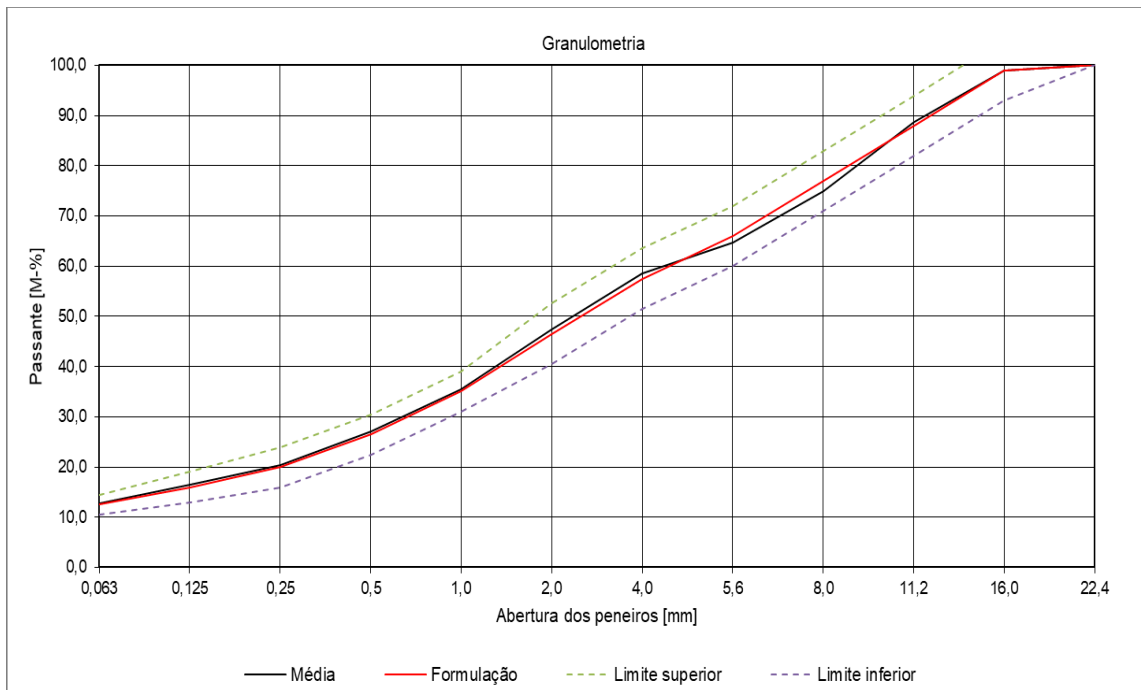


Figura 4.22 - Granulometria DACL 16 B70/100 - 2018

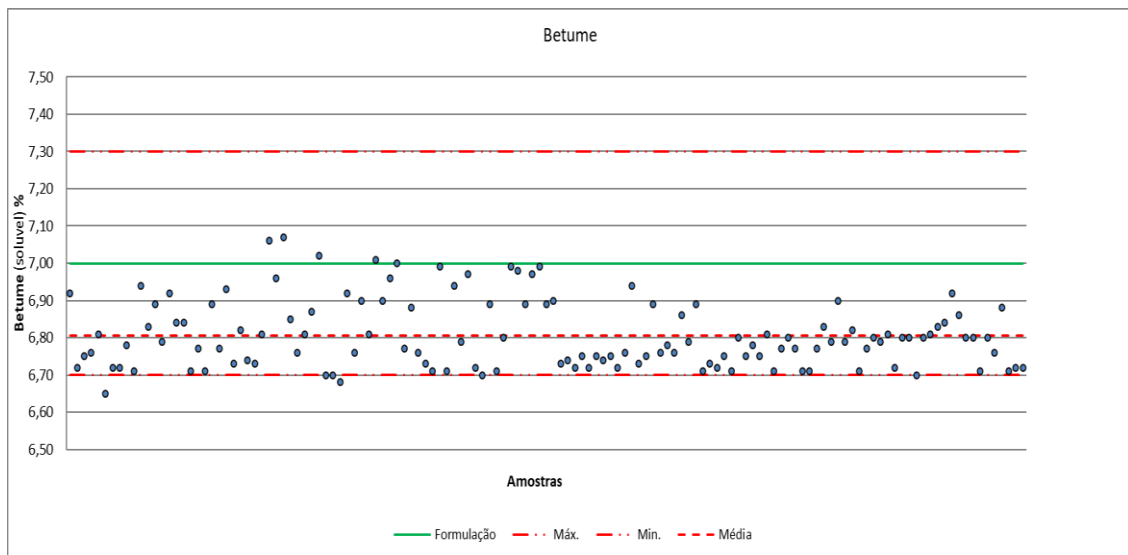


Figura 4.23 - Teor em betume DACL 16 B70/100 - 2018

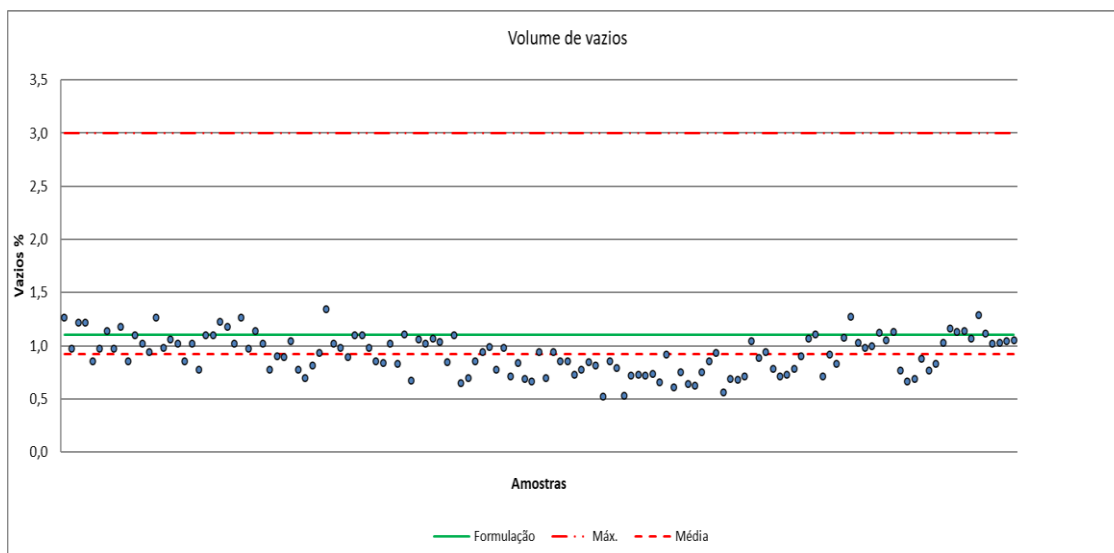


Figura 4.24 - Volume de vazios DACL 16 B70/100 – 2018

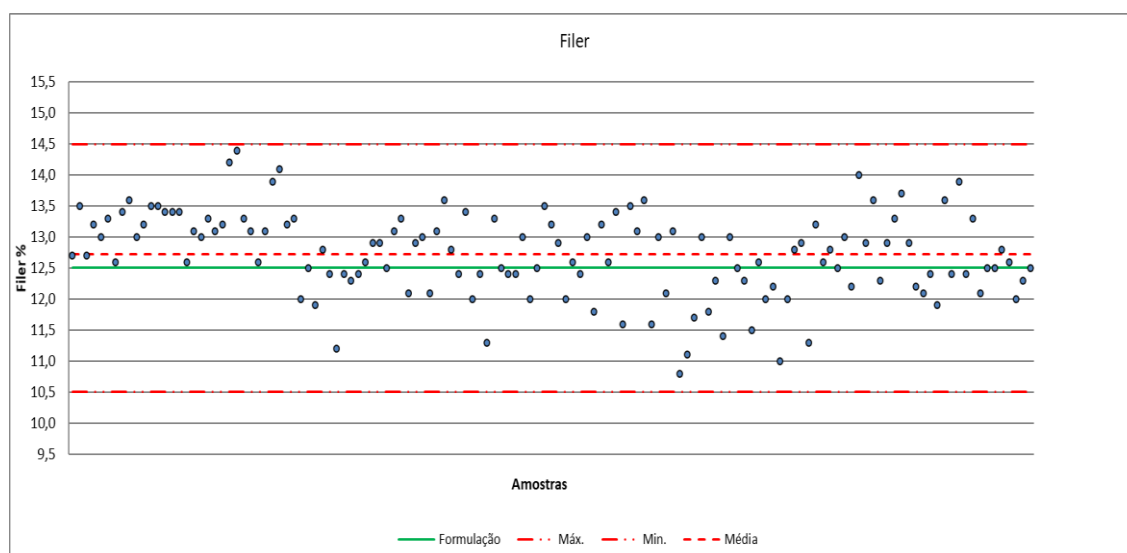


Figura 4.25 - Percentagem de filer DACL 16 B70/100 – 2018

Apresentam-se nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 os resultados do ano de 2018 que correspondem à mistura DACL 16 com o betume B160/220 relativos à granulometria, teor de betume, volume de vazios e percentagem de filer, respetivamente.

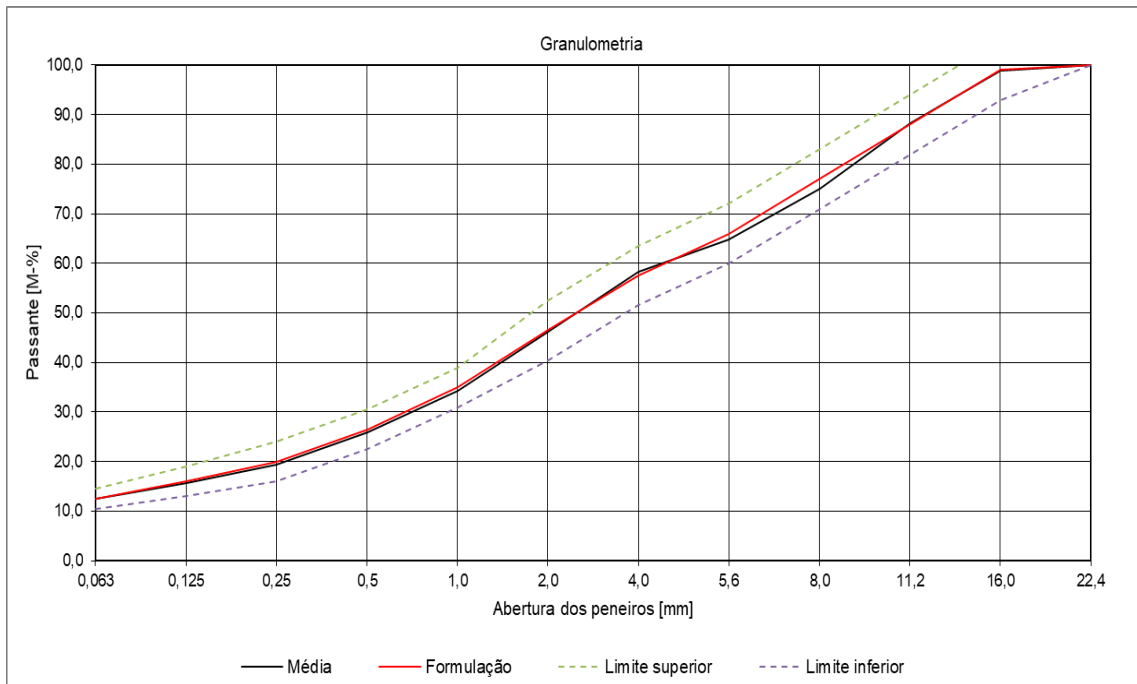


Figura 4.26 - Granulometria DACL 16 B160/220 - 2018

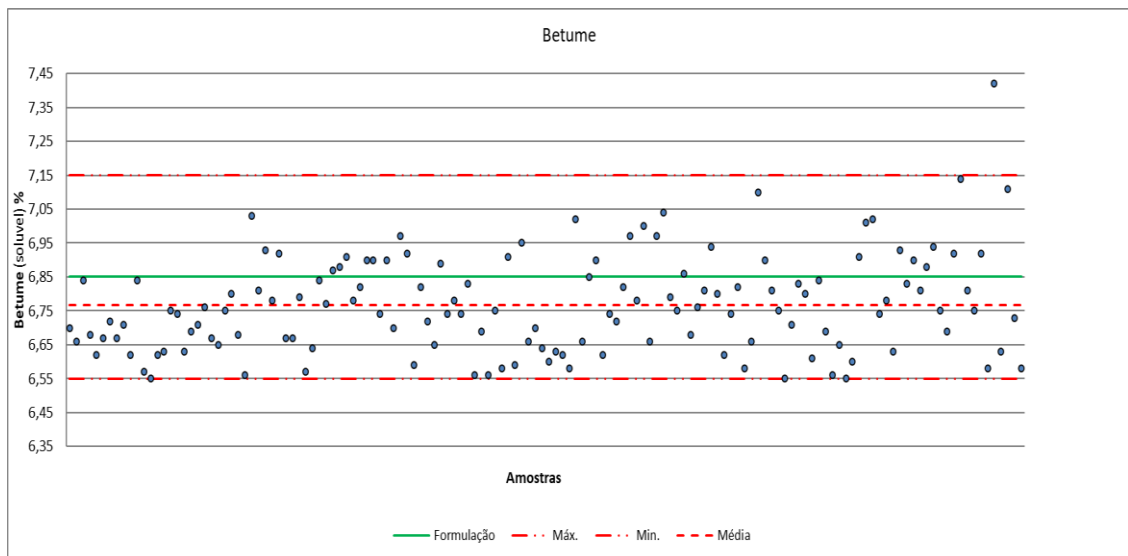


Figura 4.27 - Teor em betume DACL 16 B160/220- 2018

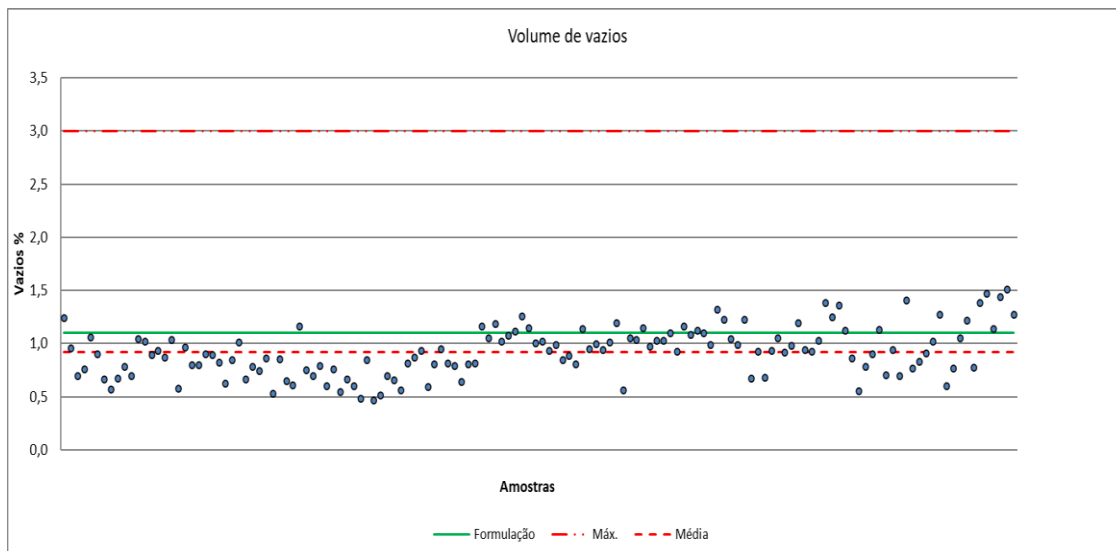


Figura 4.28 - Volume de vazios DACL 16 B160/220 – 2018

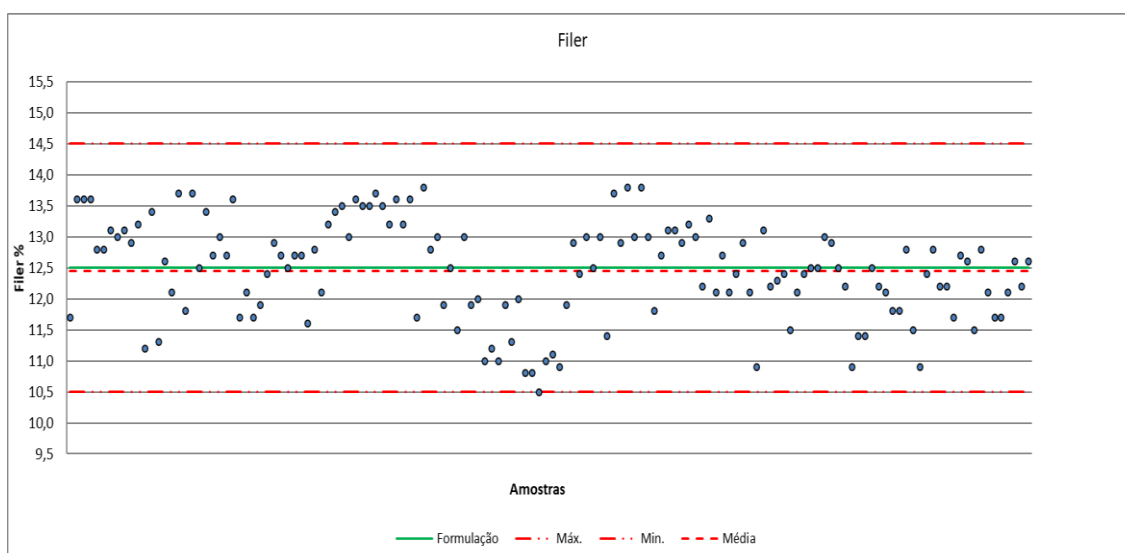


Figura 4.29 - Percentagem de filer DACL 16 B160/220 - 2018

Apresentam-se nas Figuras 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 os resultados do ano de 2019 que correspondem à mistura DACL 16 com o betume B160/220 relativos à granulometria, teor de betume, volume de vazios e percentagem de filer, respetivamente.

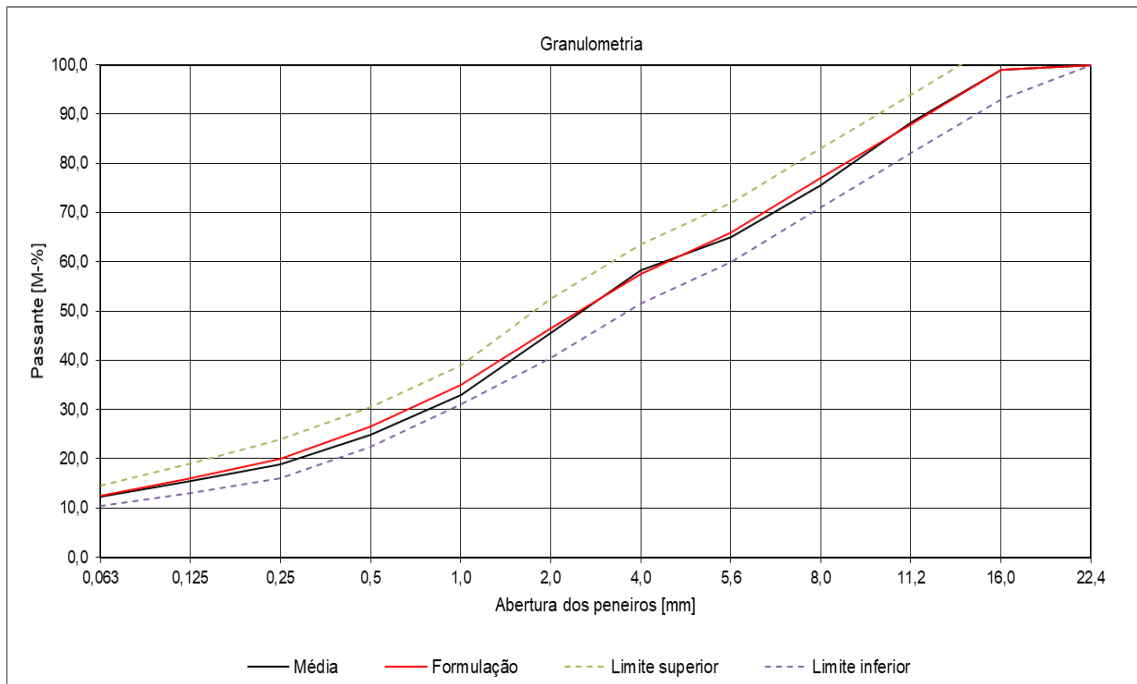


Figura 4.30 - Granulometria DACL 16 B160/220 - 2019

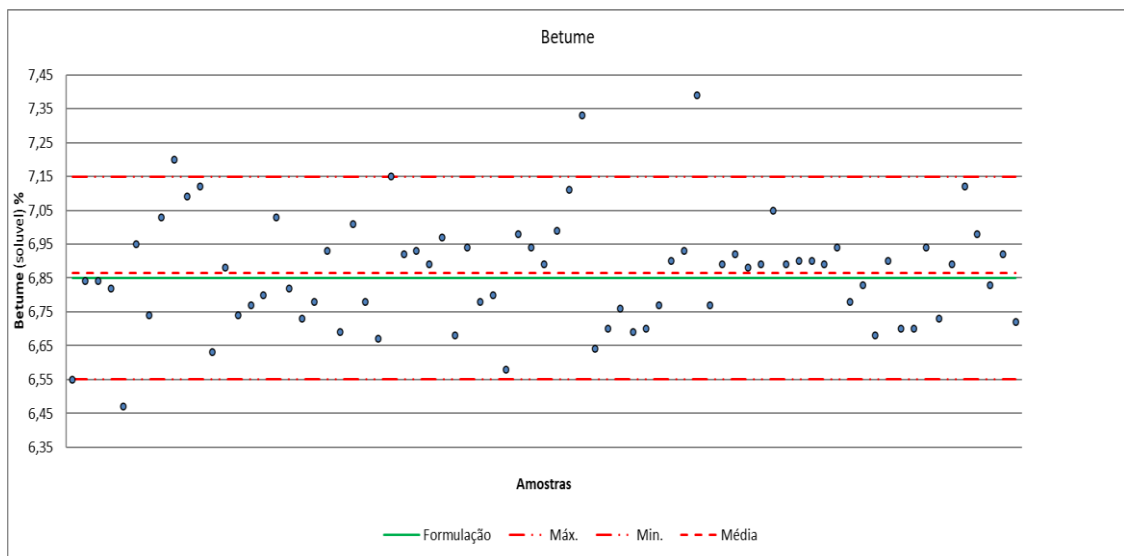


Figura 4.31 - Teor em betume DACL 16 B160/220- 2019

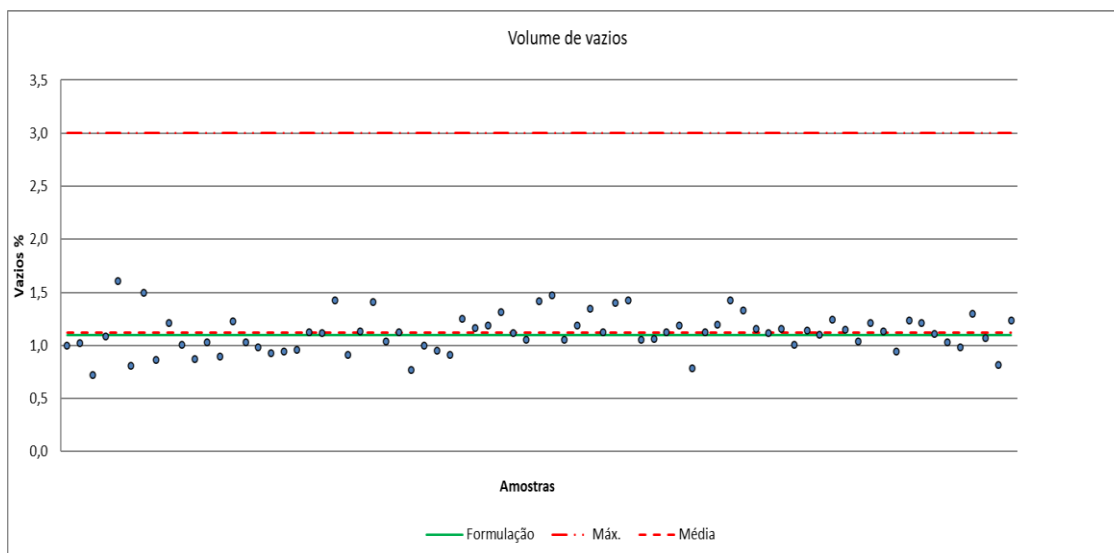


Figura 4.32 - Volume de vazios DACL 16 B160/220 – 2019

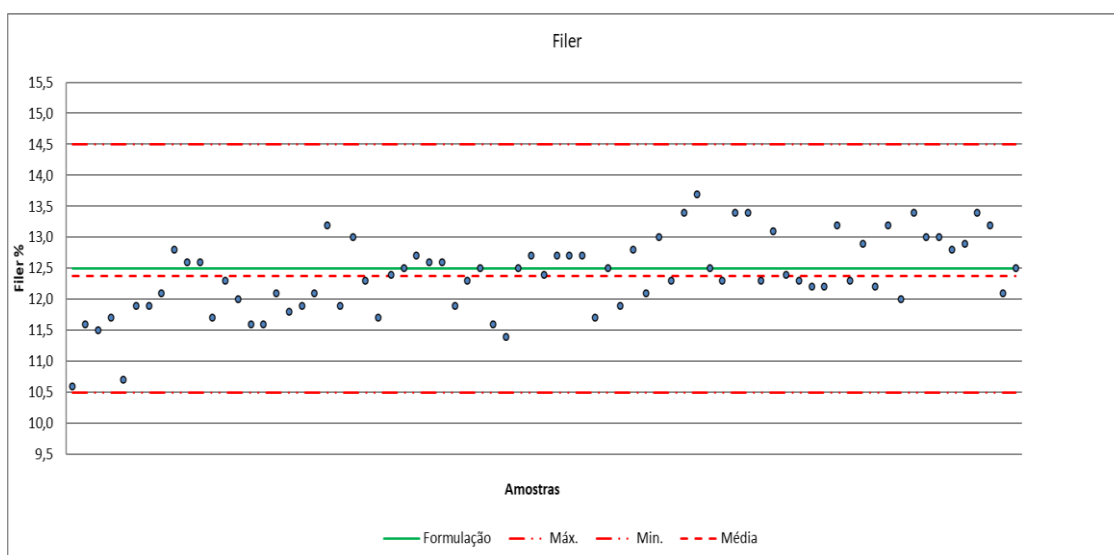


Figura 4.33 - Percentagem de filer DACL 16 B160/220 – 2019

4.4.3 Carotagem

A carotagem do núcleo asfáltico foi realizada com coroas especiais com 150mm de diâmetro após a mistura ter arrefecido o suficiente. A mistura betuminosa mantém a sua temperatura durante muito tempo (ver registo de temperatura na secção seguinte) e, mesmo que a parte superior arrefeça e esteja estável, alguns centímetros abaixo ainda se mantêm quente. Foi utilizado um equipamento de perfuração equipado com água para eliminar um aumento de temperatura durante a perfuração do núcleo. Com o equipamento apropriado foi possível a carotagem do núcleo realizar-se com profundidades de 55 cm. A parte superior e inferior de 2 a 3 cm de cada carote extraído foi cortada antes que o carote restante seja cortado em provetes de cerca de 10 cm

de espessura, identificados de A, B, C, D e E do topo para a base, como apresentado na Figura 4.34. Depois de pesados, calculou-se a baridade e o volume de vazios.



Figura 4.34 - Carotes do núcleo e provetes

Foram retirados 45 carotes da mistura com betume B70/100 e 33 da mistura com o betume B160/220. Os valores médios para o volume de vazios dos carotes do núcleo asfáltico com o betume B70/100 e B160/220 são apresentados nas Tabelas 24 e 25, respetivamente.

Tabela 4.24 - Carotes da mistura DACL 16 com B70/100

	Volume de vazios [%]					
	A	B	C	D	E	Média
Máximo	2,9	2,5	2,5	2,7	2,3	2,4
Média	2,2	1,6	1,6	1,5	1,4	1,7
Mínimo	1,1	0,7	0,9	0,4	0,3	0,9

Tabela 4.25 - Carotes da mistura DACL 16 com B160/220

	Volume de vazios [%]					
	A	B	C	D	E	Média
Máximo	3,0	2,2	1,9	1,8	1,3	2,1
Média	2,0	1,2	1,2	1,0	1,1	1,4
Mínimo	1,0	0,6	0,4	0,2	0,9	0,7

Os orifícios da carotagem no núcleo asfáltico foram cuidadosamente limpos e preenchidos em várias camadas com mistura betuminosa quente e devidamente compactados.

4.4.4 Controlo da temperatura do núcleo asfáltico em profundidade

Durante a construção do núcleo asfáltico, foram introduzidas duas sondas, uma na zona central do núcleo e outra na zona da ligação do núcleo aos espaldares, com objetivo de monitorizar a

temperatura interna. Nas Figuras 4.35 e 4.36 apresentam-se os resultados da monitorização na zona central do núcleo asfáltico.

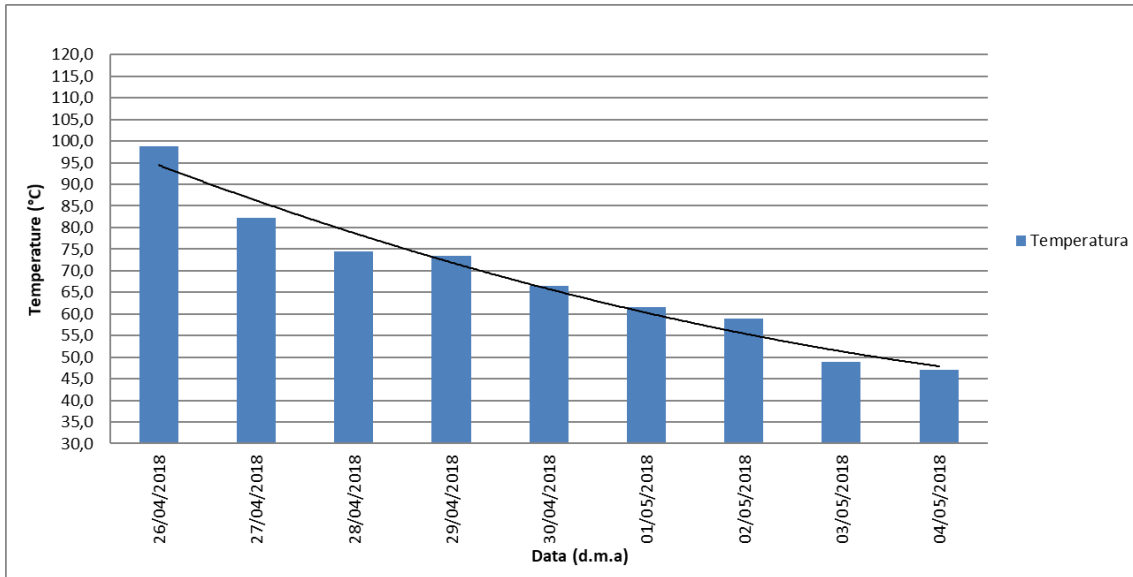


Figura 4.35 - Gráfico temperatura/dias zona central do núcleo asfáltico

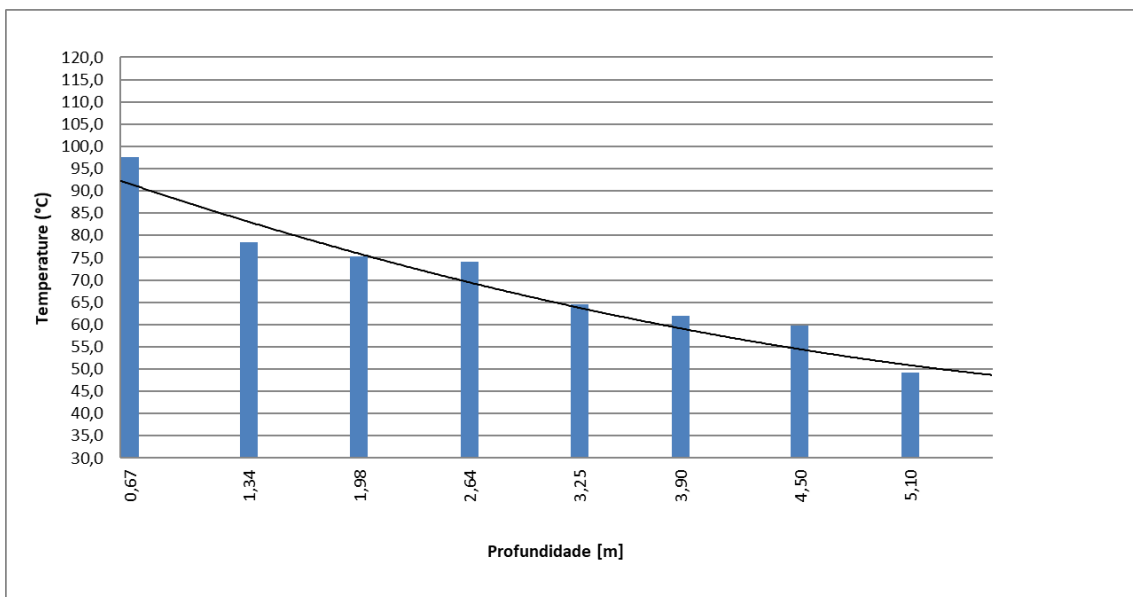


Figura 4.36 - Gráfico temperatura/profundidade zona central do núcleo asfáltico

Nas Figuras 4.37 e 4.38 apresentam-se os resultados da monitorização na zona de ligação dos espaldares com o núcleo asfáltico.

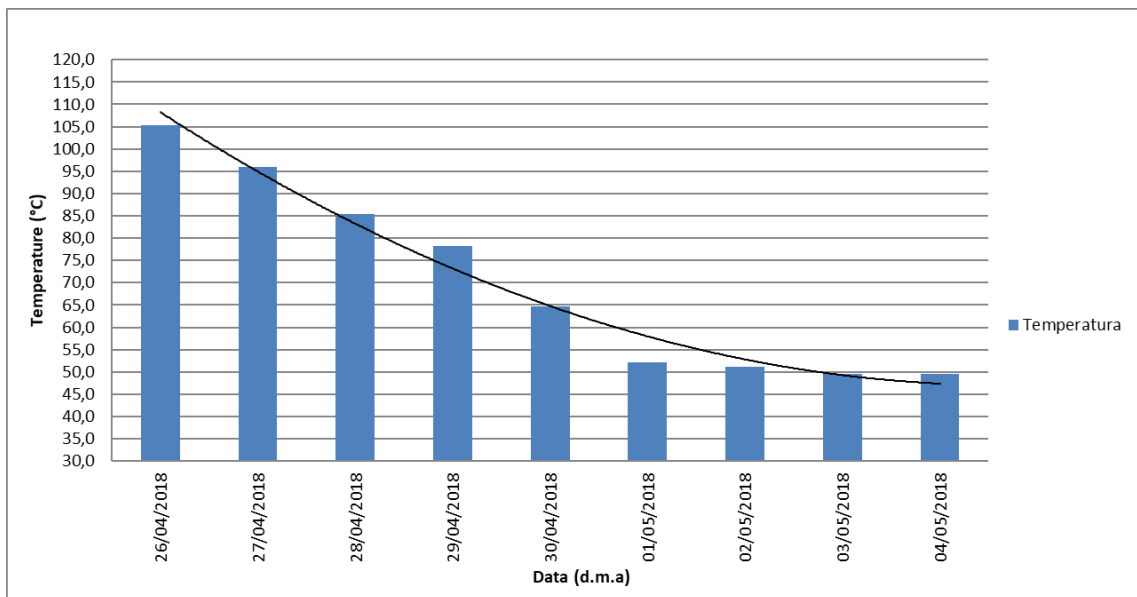


Figura 4.37 - Gráfico temperatura/dias zona dos espaldares do núcleo asfáltico

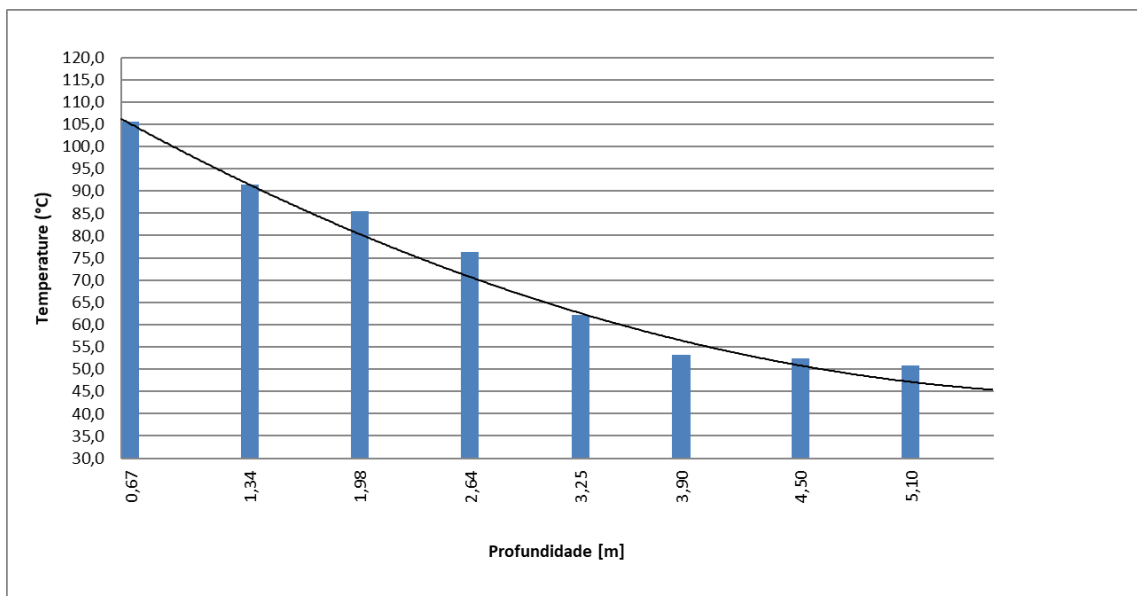


Figura 4.38 - Gráfico temperatura/profundidade zona dos espaldares do núcleo asfáltico

Após a análise das figuras anteriores verifica-se que ao longo dos 9 dias consecutivos de construção do núcleo asfáltico, atingindo uma altura de 5,10m, a perda de temperatura relativamente à temperatura inicial foi de aproximadamente 50°C.

Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

A realização do acompanhamento da construção de várias barragens de núcleo asfáltico, nomeadamente da barragem de Mogliçë na Albânia, permitiu concluir que as condições de realização em cada obra, e nomeadamente o contexto geográfico, técnico e também cultural de cada país, são preponderantes no sucesso de um bom controle de qualidade da mesma. Apesar de se utilizarem os mesmos equipamentos e, muitas vezes, o mesmo pessoal especializado em obra, e o mesmo tipo de materiais, é necessário adaptar todos os procedimentos às novas condições no terreno, especialmente, as equipas de recursos humanos.

Através da análise deste trabalho podemos concluir, de uma maneira geral, que a metodologia utilizada no controlo de qualidade foi a mais adequada para as condições específicas da obra.

É muito importante a experiência profissional dos diferentes intervenientes, nomeadamente, do operador da central betuminosa, de forma a evitar interrupções desnecessárias na produção da mistura betuminosa por desconhecimento do funcionamento correto de uma central.

A implementação de trechos experimentais em obra é da maior importância pois é nesse momento que se simulam todos os cenários possíveis durante o período de construção da barragem propriamente dito. Desta forma, é possível prevenir e antecipar problemas futuros, implementando as alterações e as correções necessárias para que, aquando da construção do corpo da barragem, não haja perdas de tempo e surpresas que levem à necessidade de ajustes de última hora.

O laboratório de obra e o acompanhamento diário é de extrema importância, por forma a, perante pequenas alterações da caracterização dos agregados, fazer os ajustes necessários da formulação da mistura na central. Para além disso, com a análise diária das propriedades das misturas betuminosas, é possível fazer os ajustes necessários à sua formulação, mantendo assim os valores característicos dentro dos limites definidos pelo dono de obra.

Nesta obra, foi dada a possibilidade da realização de estudos relativos à variação da temperatura do núcleo asfáltico em profundidade. Da análise dos resultados apresentados na secção 4.4.4, podemos concluir que o arrefecimento do núcleo em toda a sua extensão é similar e corresponde a um arrefecimento lento. Em 9 dias consecutivos de construção do núcleo asfáltico, atingindo 5,10m de altura, registou-se uma perda de aproximadamente 50°C relativamente à temperatura inicial, correspondendo a uma perda aproximada de 6.25°C por dia.

Através da análise dos resultados médios do volume de vazios observados nos carotes podemos concluir que, camada após camada, os resultados da compactação do núcleo asfáltico refletidos pela porosidade, são cada vez melhores. Pelos valores apresentados na Tabela 4.24 (Mistura

DACL 16 com B70/100), verifica-se que o provete inferior (E) apresenta uma melhoria de porosidade de $\approx 36\%$ relativamente ao provete superficial (A). Também nos valores apresentados na Tabela 4.25 (Mistura DACL 16 com B160/200) se verifica uma melhoria da porosidade do provete inferior relativamente ao provete superficial, neste caso, com uma melhoria de $\approx 45\%$.

Posteriormente à conclusão da obra da barragem de aterro com núcleo asfáltico em Mogliçë, na Albânia, em fevereiro de 2019, o autor já participou em dois projetos similares na Turquia, onde foram aplicados a mesma metodologia de controlo de qualidade e processos construtivos.

Atualmente o autor encontra-se a participar num novo projeto em Loveland, no Colorado, nos EUA, onde será utilizada a mesma tecnologia e *know-how* apreendido nas obras anteriores.

Referências bibliográficas

Blake, L. S., (1989). "Civil Engineer's Reference Book", Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain.

EAAW (2008) DGGT, "Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 5ª Edição.

Feng, S., Wang, W., Hu, W., Deng, Y., Yang, J., Wu, S., Zhang, C., Höeg, K., (2020). "Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam". Soils and Foundations, 60(4), 1036-1049. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.008>

Höeg, K., (1993). "Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams", Norwegian Geotechnical Institute, Publication No 201. ISBN 82-546-0163-1.

ICOLD, (2018). "Asphalt concrete cores for embankment dams", International Commission on Large Dams, Bulletin 179, Vienna, Austria; 2018.

ICOLD, "Bituminous Cores for Fill Dams - State of the art", International Commission on Large Dams, Bulletin 84, Paris, France; 1992.

Kalehan Energy Group, (2020). "Lower Kaleköy Dam and HEPP", acessado em 29 setembro 2020. Obtido de <http://kalehan.com.tr/en/projects/lower-kalekoy-dam-and-hepp/>

Knoop, J., Patrício, S., Mueller, D., (2018). Quality Management drives global resurgence of Asphalt Core Embankment Dams (ACED) – Hydro Conference, Gdansk, Poland, 15-17 October 2018.

Mergili, M., (2016). "Kühtai / Finstertal Reservoir", 25 setembro 2016, acessado em 29 setembro 2020. Obtido de <https://www.mergili.at/worldimages/picture.php?/10461>

Saxegaard, H., (2000). "Asphalt concrete cores for embankment dams", International Water Power & Dam Construction, 10 february 2000, acessado a 29 de setembro de 2020. Obtido de <https://www.waterpowermagazine.com/features/featureasphalt-concret-cores-for-embankment-dams/>

Schonian, E., (1999). "The Shell Bitumen Hydraulic Engineering Handbook", Shell International Petroleum Company Ltd, London, Great Britain.

Statkraft, (2017). "Method of Statement – Main dam asphalt concret works", revision 04, LAJV.0802.TEC.MS.0069.R04.

Wang, W., Feng, S., Zhang, Y, (2017). “Investigation of asphalt core-plinth connection in embankment dams”. *Case Studies in Construction Materials*, vol 7, 305-316. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.002>

Wang, W., Höeg, K., (2009). “The asphalt core embankment dam: a very competitive alternative”, 1st International Symposium on Rockfill Dams, Chengdu, China, 14-18 October 2009.

Wang, W., Höeg, K., (2010). “Developments in the design and construction of asphalt core dams”, *Hydropower & Dams*, 17(3).

Zhang, Y., Höng, K., Wang, W., Zhu, Y., (2013). Watertightness, cracking resistance, and self-healing of asphalt concrete used as a water barrier in dams. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, Number 3, 275-287. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2011-0443>