

BARRAGENS ABÓBADA EM BETÃO COMPACTADO COM CILINDROS

JOÃO BATISTA COSTA DE JESUS

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Associado Convidado, Engenheiro Domingos Manuel
Ribeiro da Silva de Matos

FEVEREIRO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais, irmã e irmão

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível devido ao contributo de todos aqueles que de uma forma ou de outra ajudaram a sua concretização, a todos muito obrigado.

Mas especialmente ao Professor Domingos Silva Matos, por quem tive o privilégio de ser orientado com profunda sabedoria e rigor e cuja disponibilidade, incentivo e incansável apoio sempre manifestados de forma amigável, foram fundamentais ao desenvolvimento e à elaboração desta dissertação.

Aos colegas e amigos Rita e Carlos que sempre me acompanharam deste o início deste percurso.

Por fim, quero expressar o meu profundo agradecimento aos meus pais, a minha irmã e ao meu irmão pelo apoio e compreensão que sempre souberam demonstrar.

RESUMO

Numerosas barragens abóbada em betão compactado com cilindros (BCC) com dupla curvatura foram construídas nos últimos quatro anos na China. Até hoje, naquele país, contabilizam-se pelo número de dezanove as barragens já construídas por esta técnica construtiva e dez em fase de construção, das quais quatro atingem alturas superiores a 100 metros.

As características da construção de barragens abóbada em betão compactado com cilindros, tal como a maior velocidade de construção e os menores custos, tornam esta solução uma hipótese viável a ter em consideração aquando da escolha do tipo de barragem a adoptar.

Neste trabalho, e essencialmente com base em pesquisa bibliográfica, faz-se um ponto da situação sobre esta técnica construtiva e sobre as análises estruturais específicas a elas associadas.

Efectua-se uma exposição sobre o comportamento térmico de barragens de betão, em fase de construção e em fase de exploração. São descritos sucintamente os principais fenómenos que regem a evolução do estado térmico de uma barragem, os factores que a influenciam e as metodologias usadas para a sua análise. É apresentado um modelo para o cálculo das variações de temperatura em barragens abóbada na fase de exploração proposto por Zhu Bofang, especialista chinês de referência nesta matéria.

Analisa-se também o comportamento estrutural de uma barragem abóbada em BCC já construída na China, com recurso ao método dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS, considerando a barragem submetida ao peso próprio, variações de temperatura e à pressão hidrostática.

ABSTRACT

A lot of roller compacted concrete (RCC) arch dams, with double curvature have been constructed in the last four years in China. Until today, in that country there are nineteen dams already constructed by this constructive method and ten under construction, four of which reach heights greater than 100 meters.

The characteristics of the construction of roller compacted concrete arch dams, namely the higher construction speed and the lower construction costs, make this solution a viable option to be considered when choosing the dam type.

In this work, the state-of-the-art of this constructive method based on literature search, as well as the specific structural analyses approaches associated, to this type of dam are briefly reported.

A presentation of the concrete dam thermal behavior, under construction and in the operational period is herein included. The main phenomena that govern the thermal state evolution of a dam and the methodologies used for their analysis are briefly described. A model for the calculation of the temperature variations for arch dams in the operational period proposed by Zhu Bofang, Chinese specialist of reference in this matter, is also presented.

It is analyzed the structural behavior of an RCC arch dam constructed in China using the finite elements method and the ANSYS software package, considering the self weight, temperature variations and hydrostatic pressure effects.

KEYWORDS: Arch dam, Roller compacted concrete, RCC arch dam, thermal analysis, structural analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	1
1.3. BARRAGENS DE BETÃO	5
1.3.1. INTRODUÇÃO	5
1.3.2. GRAVIDADE	7
1.3.3. ARCO-GRAVIDADE	8
1.3.4. ABÓBADA	10
1.4. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS DO PRESENTE TRABALHO	13
1.5. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS	14
2. ESTADO DO DESENVOLVIMENTO DE BARRAGENS ABÓBADA EM BCC NA CHINA	17
2.1. INTRODUÇÃO	17
2.2. BARRAGENS ABÓBADA EM BCC VS BETÃO CONVENCIONAL	18
2.2.1. MISTURA E COMPOSIÇÃO	18
2.2.2. PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO TÉRMICO	21
2.3. JUNTAS E INJECCÃO	23
2.3.1. FORMAÇÃO DAS JUNTAS	24
2.3.2. ARREFECIMENTO E INJECCÃO	27
2.4. OBRAS DE REFERÊNCIA	27
2.4.1.1. Barragem de Puding	28
2.4.1.2. Barragem de Shapai	29
2.4.1.3. Barragem de Shimenzi	30
2.4.1.4. Barragem de Dahuashui	31
2.4.1.5. Barragem de Picada	34

3. MODELO DE CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	37
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. TRANSMISSÃO DE CALOR	37
3.2.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS	38
3.2.2. CONDUÇÃO	38
3.2.3. CONVECÇÃO.....	39
3.2.4. RADIAÇÃO	39
3.3. FACTORES CLIMÁTICOS	39
3.3.1. RADIAÇÃO SOLAR	39
3.3.2. TEMPERATURA DO AR	40
3.3.2.1. Descrição da formulação	40
3.3.2.2. Aplicação da formulação	41
3.3.3. TEMPERATURA DA ÁGUA	42
3.3.3.1. Descrição da formulação	42
3.3.3.2. Aplicação da formulação	43
3.4. ASPECTOS GERAIS DO ESTUDO TÉRMICO DE BARRAGENS	44
3.5. CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EM BARRAGENS ABÓBADA DE BCC EM FASE DE EXPLORAÇÃO	46
3.5.1. CASO 1 - CONSTRUÇÃO SEM JUNTAS DE CONTRACÇÃO E SEM ARREFECIMENTO ARTIFICIAL	47
3.5.2. CASO 2 - CONSTRUÇÃO COM JUNTAS DE CONTRACÇÃO E ARREFECIMENTO ARTIFICIAL	48
3.5.3. CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	49
3.5.3.1. Cálculo de T_{m0} e T_{d0}	50
3.5.3.2. Cálculo de T_{m1} e T_{d1}	52
3.5.3.3. Cálculo de T_{m2} e T_{d2}	53
3.6. EXEMPLO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA CONSTRUÍDA EM BCC E EM BETÃO CONVENCIONAL	54
4. ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARRAGEM ABÓBADA EM FASE DE EXPLORAÇÃO	59
4.1. INTRODUÇÃO	59
4.2. GEOMETRIA	60
4.3. ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS	62
4.4. MODELO E GERAÇÃO DA MALHA	64

4.5. ANÁLISE ESTÁTICA DA BARRAGEM	66
4.5.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	66
4.5.2. ACÇÕES	67
4.5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.5.3.1. Influência da fundação	68
4.5.3.2. Análise global dos resultados obtidos	73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de Upper Stillwater.....	2
Figura 2 – Evolução do número de barragens de BCC	3
Figura 3 – Distribuição das Barragens de BCC por país	4
Figura 4 – Barragem de Gravidade.....	6
Figura 5 – Barragens Abóbada	6
Figura 6 – Método de transmissão de forças à fundação de uma barragem por gravidade	7
Figura 7 – Barragem de Pracana.....	8
Figura 8 – Distribuição do impulso da água em barragens arco gravidade	9
Figura 9 – Barragem de Castelo de Bode.....	9
Figura 10 – Barragem do Alqueva	10
Figura 11 – Distribuição do impulso da água em barragens abóbada	11
Figura 12 – Barragem de Aguieira	12
Figura 13 – Barragem de Shapai	17
Figura 14 – Barragem abóbada em betão convencional (“Cold Arch”)	22
Figura 15 – Barragem abóbada em BCC (“Warm Arch”).....	23
Figura 16 – Juntas transversais (Bofang, 2003)	24
Figura 17 – Junta transversal da Barragem de Shapai (Bofang, 2003).....	25
Figura 18 – Blocos pré-fabricados de betão (Shengpei, 2007)	26
Figura 19 – Formação de Juntas (Shengpei, 2007).....	26
Figura 20 – Barragem de Puding (Shen, 2007)	28
Figura 21 – Barragem de Shapai (Shengpei, 2007)	29
Figura 22 – Barragem de Shimenzi (Shen, 2007).....	30
Figura 23 – Junta perimetral (Shen, 2007)	31
Figura 24 – Barragem de Dahuashui (Shen, 2007)	31
Figura 25 – Evolução dos trabalhos na barragem de Dahuashui (Sinohydro, 2007)	32
Figura 26 – Paramento de jusante da barragem de Dahuashui	33
Figura 27 – Barragem de Picada (tirado de http://www.odebrechtonline.com.br)	34
Figura 28 – Formação esquemática das juntas e propriedades do BCC (Stucky, 2006).....	35
Figura 29 – Onda térmica actuando no paramento de jusante.....	41
Figura 30 – Temperatura na albufeira.....	44
Figura 31 – Temperatura nas fronteiras.....	45

Figura 32 – Distribuição de temperatura na secção de uma barragem (Bofang, Z., Zhanmei, L., 1990)	46
Figura 33 – Evolução da temperatura em barragens abóbada sem arrefecimento artificial (adaptado de Army Corps of Engineers, 1994)	48
Figura 34 – Evolução da temperatura em barragens abóbada com arrefecimento artificial (adaptado de Army Corps of Engineers, 1994)	49
Figura 35 – Coeficiente N e s para perdas de calor pelos paramentos e superfície das camadas (Bofang, 2003)	51
Figura 36 – Variações de temperatura em função do tempo no modelo de BCC (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)	55
Figura 37 – Variações de temperatura em função do tempo no modelo em BV (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)	55
Figura 38 – Comparação das temperaturas e gradientes térmicos (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)	56
Figura 39 – Tensões principais máximas no modelo de BCC (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)	57
Figura 40 – Tensões principais máximas no modelo em BV (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)	57
Figura 41 – Barragem de Zhaolaihe (http://www.cwb11.com/jushudanwei/hasgj.html)	59
Figura 42 – Secção transversal e alçado da barragem de Zhaolaihe (Shengpei, 2007)	60
Figura 43 – Vista em planta e secção transversal (adaptado de (Li, 2007))	60
Figura 44 – Elemento de 20 nós (ANSYS, 2007)	63
Figura 45 – Direcção das tensões (S_x , S_y e S_z) no elemento SOLID186 (ANSYS, 2007)	63
Figura 46 – Modelo definido por volumes	64
Figura 47 – Malha de elemento finitos hexaédricos	65
Figura 48 – Malha de elementos finitos utilizada	66
Figura 49 – Malha de elementos finitos do corpo da barragem	66
Figura 50 – Deslocamentos horizontais da consola central a montante para a combinação 1	68
Figura 51 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos para a combinação 1 ..	69
Figura 52 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas para a combinação 1	70
Figura 53 – Deslocamentos horizontais da consola central a montante para a combinação 2	71
Figura 54 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos para a combinação 2 ..	72
Figura 55 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas para a combinação 2	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução mundial da construção de barragens de BCC em arco	5
Tabela 2 – Características das principais barragens abóbada de BCC chinesas (Shengpei, 2007) ...	18
Tabela 3 – Resistência ao corte entre camadas em duas barragens com mais de 200 m de altura (Shengpei, 2007).....	21
Tabela 4 – Parâmetros da barragem de Zhaolaihe (Li, 2007)	62
Tabela 5 – Resumo das propriedades dos materiais (Li, 2007)	67
Tabela 6 – Combinação de acções.....	68
Tabela 7 – Valores máximos das tensões principais mínimas e máximas.....	73
Tabela 8 – Resultados das tensões principais (Li, 2007)	74
Tabela 9 – Tensões principais não considerando as zonas próximas do contacto barragem-fundação	74

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Para clareza de exposição, far-se-á no texto a descrição de cada notação ou símbolo aquando da sua primeira utilização.

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A crescente utilização de Betão Compactado com Cilindros (BCC) na construção de barragens de betão verificada no final do século passado pode considerar-se um marco na história deste tipo de obras, assente numa maior simplicidade dos métodos construtivos, na diminuição dos prazos de construção e na redução do custo global das obras.

Esta nova tecnologia começou a ser aplicada em barragens de gravidade em 1961 com a construção da barragem de Buchtarma no Cazaquistão e utilizada em barragens de gravidade com ligeira curvatura em planta no final dos anos 70 na China, com a construção das barragens de Langshan (1978) e de Liangsanping (1981). No entanto, considera-se a barragem de Knellpoort em África do Sul inaugurada em 1988 como sendo a 1ª barragem de arco-gravidade em BCC e impulsora de uma nova era na construção de barragens de BCC.

Ao longo dos anos e com a evolução do número de barragens, esta técnica sofreu várias alterações e novas tendências no que respeita a dosagens, colocação e transporte, sendo de assinalar a evolução verificada na China com a construção de barragens abóbada com dupla curvatura em BCC.

De facto, a barragem abóbada em betão compactado com cilindros combina a rapidez de construção associada à tecnologia de BCC com as vantagens do comportamento estrutural da barragem abóbada, tendo-se tornado uma alternativa competitiva para a concepção e construção de barragens.

1.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Desde os anos 60 e 70, muitos projectistas de barragens de diversos países em todo mundo estudaram um novo processo para a construção de barragens de betão, tendo dado forma aos dois métodos representativos: o método americano (RCC - Roller Compacted Concrete) conhecido entre nós por (BCC) e o método Japonês (RCD – Roller Compacted Dam).

Assim, foi na década de 70 que se iniciaram os estudos sistemáticos que levaram à construção de barragens de BCC, nomeadamente nos Estados Unidos – U.S. Army Corps of Engineers (USACE) e Tennessee Valley Authority (TVA), e no Reino Unido – Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), com a realização de estudos e de blocos experimentais (Santana, 1996).

Tradicionalmente as barragens de betão são construídas por blocos verticais divididos por juntas transversais com espaçamento entre 15 a 20 metros. As juntas são providas de sistemas de estanqueidade que para além de promoverem a impermeabilização permitem delimitar

compartimentos para injeção com caldas de cimento (a injeção de juntas, efectuada após a conclusão da construção da barragem e antecedendo o enchimento da albufeira, constitui um procedimento fundamental na construção convencional de barragens abóbada).

Contrariamente às barragens de betão convencional (BC), a construção de barragens de BCC caracteriza-se pela sua construção na horizontal, com a deposição contínua de camadas de betão seco formando blocos de betão em massa de grande dimensão consolidado por vibração externa, efectuada com os cilindros vibradores usados na compactação de solos. As primeiras barragens de BCC, como a barragem de Upper Stillwater concluída em 1987 nos EUA, ilustrada na Figura 1, destacam-se pela eliminação ou grande espaçamento entre juntas transversais, levando em alguns casos ao insucesso devido ao excesso de fissuração. Este facto, conduziu à necessidade de se proceder a estudos térmicos estruturais para melhor definição do tipo de junta, transversal ou induzida, e do espaçamento entre juntas a considerar em cada caso. As construções posteriores aproveitando a evolução do conhecimento sobre o material, mostram que o BCC pode atingir níveis de qualidade semelhantes ao do betão convencional.



Figura 1 – Barragem de Upper Stillwater

Ao mesmo tempo que em outros países se desenvolvia o BCC, no Japão trabalhava-se no sentido de se optimizarem os métodos de construção das barragens de betão, de modo a aumentar o ritmo de colocação do material e a diminuir os custos da construção. O Ministério da Construção criou um Comité constituído por especialistas em barragens que, desde 1974, promoveu trabalhos de investigação no domínio das barragens de betão compactado com cilindros, dando origem a uma tecnologia um pouco diferente da utilizada nos restantes países, designada por Roller Compacted

Dams (RCD). Foram assim efectuados ensaios a larga escala na ensecadeira da barragem de Ohkawa (1976), cujos resultados demonstraram a adequabilidade do método. Construiu-se então a barragem de Shimajigawa (concluída em 1980), à qual se seguiu a barragem de Tamagawa. Assim, o RCD mantém o tipo de construção tradicional por blocos e a distância entre juntas transversais. A diferença reside no processo de aplicação do betão em cada bloco, utilizando-se betão compactado com cilindros em vez do betão convencional com vibração interna.

As condições acima descritas e ainda as difíceis condições sísmicas, hidrológicas e topográficas existentes na maioria dos locais do arquipélago japonês, de origem vulcânica, conduziram os projectistas a abordagens mais conservadoras, afastando-se do betão convencional cautelosamente e procurando um produto com a mesma aparência e a mesma qualidade que o betão tradicional em massa. Por isso as barragens japonesas têm oferecido, até à data, melhores condições de estanqueidade que as outras barragens de BCC (Ribeiro, 1998).

Como se verifica pela Figura 2, a construção de barragens em BCC tem tido um incremento significativo em todo mundo, o que tem conduzido a sucessivos melhoramentos das técnicas de projecto, construção, controlo de qualidade e procura de maior economia. As barragens de betão compactado com cilindros já foram executadas em inúmeros países como se apresenta na Figura 3, destacando-se entre eles, China, Brasil, Espanha, USA, Japão, Marrocos, África do Sul, Austrália, México e ultimamente Grécia e Vietname.

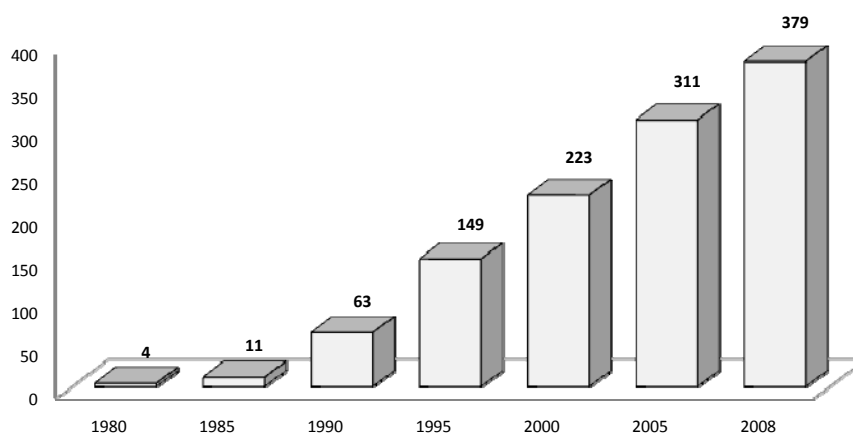


Figura 2 – Evolução do número de barragens de BCC¹

Em Portugal também já foi construída uma barragem de BCC, a barragem de Pedrógão no rio Guadiana a jusante da barragem do Alqueva, estando em fase de construção a barragem de jusante do aproveitamento hidroeléctrico de Baixo Sabor. Ambas são barragens do tipo gravidade de eixo rectilíneo e com alturas de 43 m e 45 m, respectivamente.

¹ Gráfico obtido através da base de dados de Malcom and Dustan & Associates em <http://www.rccdams.co.uk>.

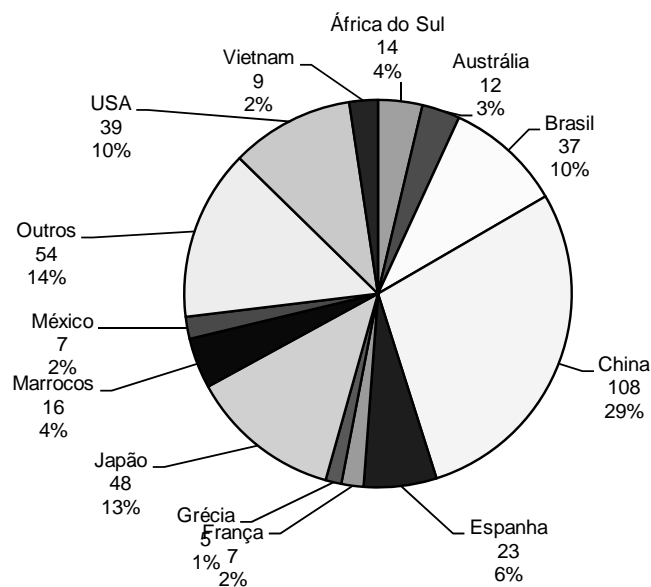


Figura 3 – Distribuição das Barragens de BCC por país²

As tendências actuais apontam no sentido de um crescente aproveitamento desta técnica a nível mundial, verificando-se na China também um crescente número de realizações de barragens abóbada em BCC, construídas e em projecto.

Como indica a Tabela 1 foi na África do Sul que primeiro se desenvolveu esta técnica para a construção de grandes barragens. No entanto, na última década é na China que se verifica um crescimento acentuado desta arte, apontando não só para um crescimento numérico mas também na adopção de secções com dupla curvatura próximas das utilizadas nas construções de betão convencional e com o alcance de novas alturas e de maiores volumes de BCC.

De facto, a China progrediu muito com o desenvolvimento dos projectos das barragens de Puding e de Shapai não só em prática bem como em teoria, o que lhes confere hoje a possibilidade de construir barragens de abóbada em BCC com mais de 100 m de altura, prevendo-se o amplo uso desta nova tecnologia nas próximas construções de barragens para recursos hídricos e projectos hidroeléctricos (Qiuhua, 2003).

² Gráfico obtido através da base de dados de Malcom and Dustan & Associates em <http://www.rccdams.co.uk>.

Tabela 1 – Evolução mundial da construção de barragens de BCC em arco

Nº	Nome	País	Tipo	Altura (m)	Comprimento (m)	Situação da Construção do BCC
1	Langshan	China	Arco-Gravidade	41	173	Concluída em 1978
2	Lianganping	China	Arco-Gravidade	35	33	Concluída em 1981
3	Knellpoort	África do Sul	Arco-Gravidade	50	200	Concluída em 1989
4	Wolwedans	África do Sul	Arco-Gravidade	70	268	Concluída em 1989
5	Mao eryan	China	Arco-Gravidade	35	38	Concluída em 1992
6	Paxton	África do Sul	Arco-Gravidade	17	70	Concluída em 1992
7	Puding	China	Abóbada	75	196	Concluída em 1993
8	Wenquanpu	China	Arco (Fino)	48	188	Concluída em 1994
9	Xibingxi	China	Arco-Gravidade	63	93	Concluída em 1995
10	Hongpo	China	Arco-Gravidade	55	244	Concluída em 1999
11	Longshou	China	Arco-Gravidade D.C	80	258	Concluída em 2001
12	Liubo	China	Arco-Gravidade	70	258	Concluída em 2003
13	Shankou No3	China	Arco (Fino)	57	179	Concluída em 2001
14	Shapai	China	Arco (Fino)	132	250	Concluída em 2001
15	Shimenzi	China	Abóbada	109	176	Concluída em 2001
16	Linhekou	China	Arco-Gravidade D.C	100	311	Concluída em 2003
17	Qilinguan	China	Arco-Gravidade	77	132	Concluída em 2005
18	Zhaolaihe	China	Abóbada	107	206	Concluída em 2005
19	Qinglianxi	China	Arco (Fino)	96	178	Concluída em 2005
20	Dahuashui	China	Abóbada	135	199	Concluída em 2006
21	Yujianhe	China	Arco-Gravidade D.C	81	180	Concluída em 2006
22	Bailianya	China	Arco-Gravidade	104	348	Concluída em 2007
23	Shaba	China	Arco-Gravidade	87	149	Concluída em 2007
24	Xuanmiaoguan	China	Arco-Gravidade	80	243	Concluída em 2007
25	Xiaqiao	China	Arco-Gravidade	68	213	Concluída em 2007
26	Maobaguan	China	Arco-Gravidade	66	120	Concluída em 2007
27	Longqiao	China	Abóbada	95	156	Concluída em 2007
28	Huanghuazhai	China	Abóbada	118	247	Em construção
29	Yunlonghe III	China	Abóbada	135	119	Em construção
30	Luopo	China	Abóbada	114	191	Em construção
31	Yunkou	China	Abóbada	119	152	Em construção
32	Tianhuaban	China	Abóbada	113	160	Em construção
33	Sai zhu	China	Abóbada	72	160	Em construção
34	Sanliping	China	Abóbada	133	285	Em construção
35	Maduhe	China	Abóbada	99	250	Em construção
36	Weihou	China	Abóbada	82	271	Em construção

D.C - Dupla Curvatura

1.3. BARRAGENS DE BETÃO

1.3.1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, o homem inspirando-se talvez na técnica do castor para a protecção das suas cidades lacustres, sempre construiu reservas de água, para sua alimentação, rega, irrigação, regularização dos rios, alimentação de canais ou supressão de cheias, assim como por necessidades de desenvolvimento (Bourgin, 1955).

Estas barragens tomaram, desde o século passado, com o desenvolvimento hidroeléctrico, dimensões consideráveis. Concebidas inicialmente como necessárias para a regularização anual da produção de

energia, são agora também importantes para a produção diária e em fortes períodos de procura. As albufeiras criadas pelas barragens constituem um risco potencial para o vale a jusante pois em caso de ruptura da barragem provocam uma onda de cheia com elevado potencial destruidor. Este aspecto justifica o extremo cuidado que é colocado no projecto e na construção de barragens, bem como no acompanhamento do seu comportamento estrutural, hidráulico e ambiental, durante a fase de exploração.

Existem variados tipos de barragens de betão, que se distinguem pela sua geometria e funcionamento estrutural.

As barragens gravidade são as mais simples e mais comuns, sendo a sua estabilidade ao escorregamento e derrube motivado pelo impulso da água assegurado pelo peso do betão da própria estrutura, e tendo como perfil tipo o indicado na Figura 4. Estas estruturas podem ser aligeiradas por vazamentos internos ou externos (as barragens de contrafortes com cabeça de diamante são um exemplo deste último caso).

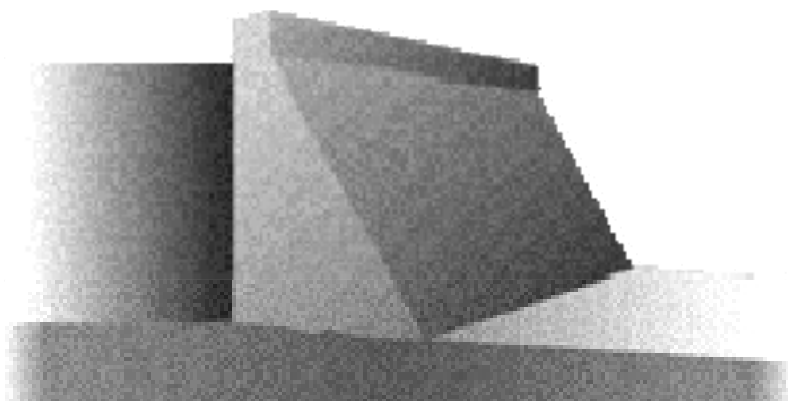


Figura 4 – Barragem de Gravidade

As barragens em arco ou abóbada como se apresenta na Figura 5, são constituídas por estruturas contínuas de menor espessura, com simples ou dupla curvatura, para fechar o vale em que se insere. Estas barragens têm uma geometria mais elaborada, dependendo da sua forma a adequada transferência para a fundação dos esforços originados pela pressão hidrostática induzida pela albufeira.

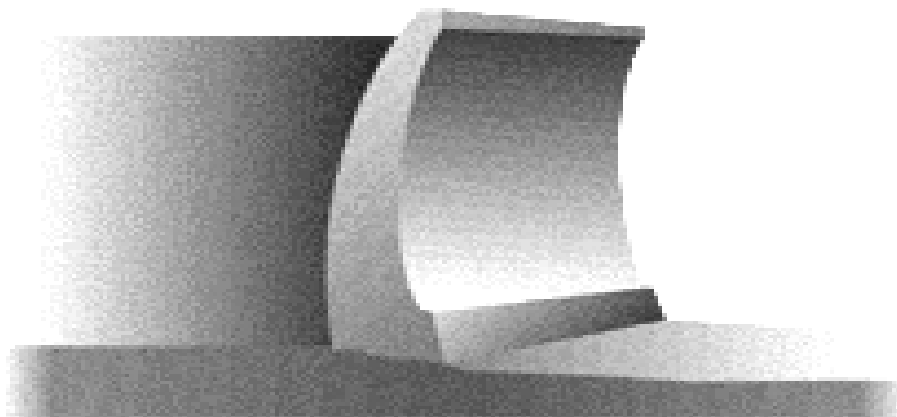


Figura 5 – Barragens Abóbada

As barragens em arco-gravidade utilizam uma combinação dos dois tipos anteriormente apresentados para resistir aos esforços actuantes na estrutura.

De seguida são apresentados com maior pormenorização os principais tipos de barragens.

1.3.2. GRAVIDADE

As barragens de gravidade são barragens que resistem à acção horizontal da água unicamente pelo seu peso próprio, apesar de em alguns casos poderem descrever uma curva em planta sem efeitos estruturais. Neste tipo de barragens as tensões são transmitidas à fundação dos blocos por fluxos em planos verticais como se ilustra na Figura 6, e têm em geral valores moderados pelo que não são muito exigentes em relação à qualidade da rocha de fundação. Adequam-se a serem implantadas em vales largos embora possam ser também construídas em vales estreitos.

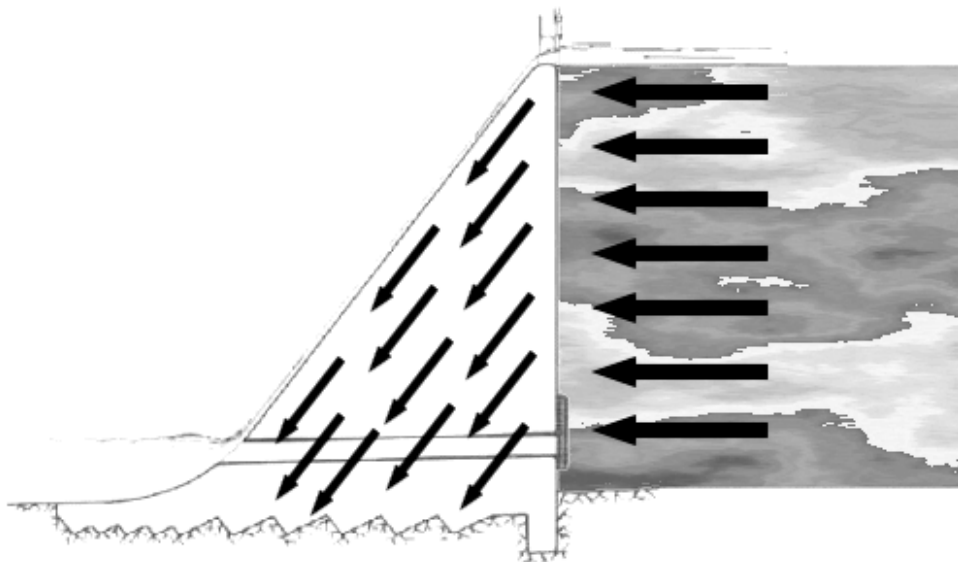


Figura 6 – Método de transmissão de forças à fundação de uma barragem por gravidade

No sentido de diminuir o volume de betão utilizado neste tipo obras, tem-se recorrido a vários tipos de aligeiramentos. Em Portugal foi corrente a utilização de vazamentos internos de grandes dimensões, como nos casos das barragens da Carrapatelo, Régua, Valeira e Pocinho no rio Douro, da barragem do Torrão no rio Tâmega e da barragem de Touvedo no rio Lima.

Conforme atrás referido, o aligeiramento externo configura o exemplo de barragens gravidade de contrafortes. Em Portugal temos como exemplo de uma estrutura deste tipo, a barragem de Pracana, no rio Ocreza, ilustrada na Figura 7.



Figura 7 – Barragem de Pracana

A utilização de cabos de pré-esforço, em posição vertical ou sub-vertical e penetrando na fundação, é uma solução que permite melhorar as condições de estabilidade de uma barragem gravidade e promover uma diminuição do volume de betão da barragem. Esta solução tem sido mais utilizada em alteamento ou reforço de barragens existentes. Anota-se a sua aplicação no alteamento da barragem de Cova do Viriato, na Serra da Estrela.

1.3.3. ARCO-GRAVIDADE

Dado que as barragens abóbadas não se adaptam adequadamente em vales muito largos, torna-se por vezes necessário empregar uma solução híbrida. As barragens arco-gravidade têm a particularidade de usufruir de uma solução mista que concilia as vantagens de uma barragem abóbada com as de uma barragem gravidade. Assim, estas barragens caracterizam-se por descreverem um arco em planta e uma secção transversal triangular típica das barragens gravidade, com uma ligeira inclinação a montante e uma inclinação a jusante menos acentuada, como se ilustra na Figura 8.

Citam-se como exemplos deste tipo de barragem em Portugal, a barragem de Castelo de Bode no rio Zêzere representada na Figura 9 e a barragem de Venda Nova no rio Cávado. Assinala-se também o caso da barragem de Bemposta, no troço internacional do rio Douro, que é uma barragem arco gravidade provida de um expressivo vazamento (barragem arco-gravidade aligeirada).

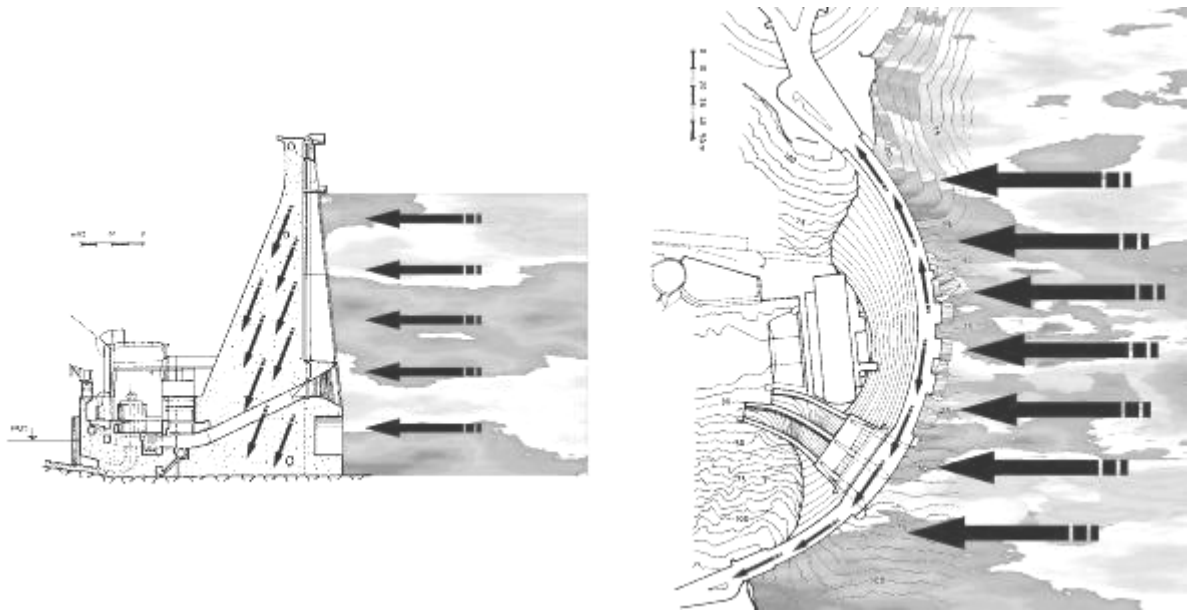


Figura 8 – Distribuição do impulso da água em barragens arco gravidade

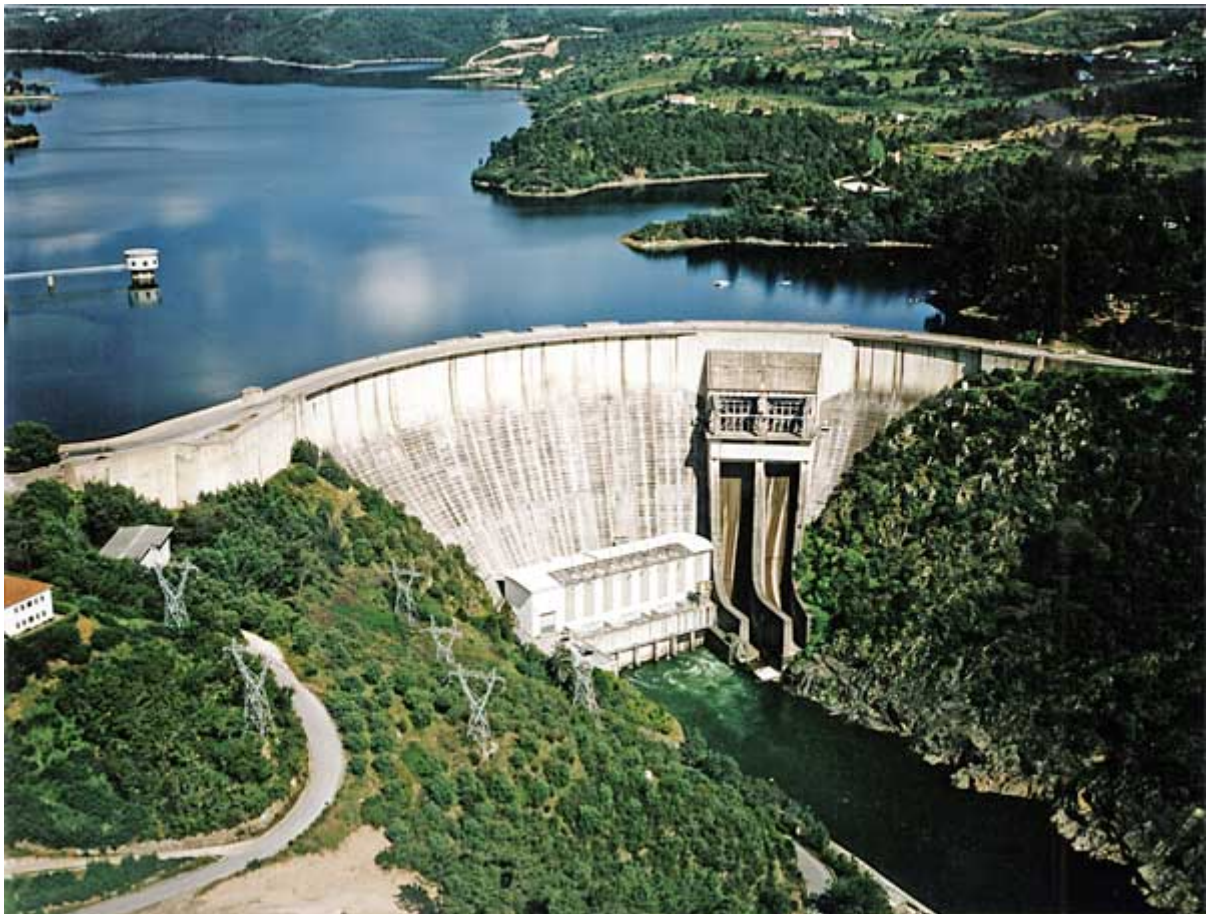


Figura 9 – Barragem de Castelo de Bode

1.3.4. ABÓBADA

De entre os vários tipos de barragens, as barragens abóbadas distinguem-se por necessitarem para a sua estabilidade da contribuição do efeito da reacção dos encontros (encostas do vale).

Retraçando o desenvolvimento histórico das barragens abóbadas, distinguem-se quatro épocas marcantes no seu desenvolvimento: as barragens em arco Romanas, uma série de barragens Mongóis no Irão construídas no século 13, as barragens de alvenaria no começo do século 19 e as barragens abóbadas de betão australianas. O desenvolvimento das barragens abóbada atingiu o seu estado de maturidade em meados do século 19 com a introdução do betão como material de construção, permitindo o aparecimento de novas formas hoje em dia utilizadas (acedido em http://traianvs.net/textos/archdams_fr.htm).

Em Portugal existem diversos exemplos de barragens abóbada de dupla curvatura, salientando-se a barragem do Cabril no rio Zêzere que com 127 m de altura é a mais alta do país. Citam-se também como realizações recentes os exemplos da barragem do Alto Lindoso, no rio Lima, e de Alqueva no rio Guadiana, constituindo esta última o exemplo de uma barragem abóbada de grande vão, dotada de encontros artificiais nas margens. Em relação às realizações portuguesas releva-se também a barragem da Aguieira, no rio Mondego, como exemplo de uma barragem de abóbadas múltiplas.

Este tipo de barragem enquadra-se preferencialmente em vales em V relativamente estreitos, apesar de também se adaptar em outros ambientes topográficos, chegando mesmo a ser adoptado em casos mais difíceis de vales largos em forma de U como a barragem de Alqueva no rio Guadiana representada na Figura 10. A barragem abóbada, também designada por barragem de dupla curvatura, tem uma secção transversal e longitudinal em arco, o que permite reduzir substancialmente a espessura da abóbada e o volume da barragem.



Figura 10 – Barragem do Alqueva

Se a barragem de gravidade conduz os esforços devidos à pressão hidrostática para a fundação na direcção vertical (efeito de consola), já a barragem abóbada distribui a maior parte dos esforços para o maciço de fundação lateral, por efeito de arco o que permite tirar um melhor partido das propriedades mecânicas do betão como se ilustra na Figura 11.

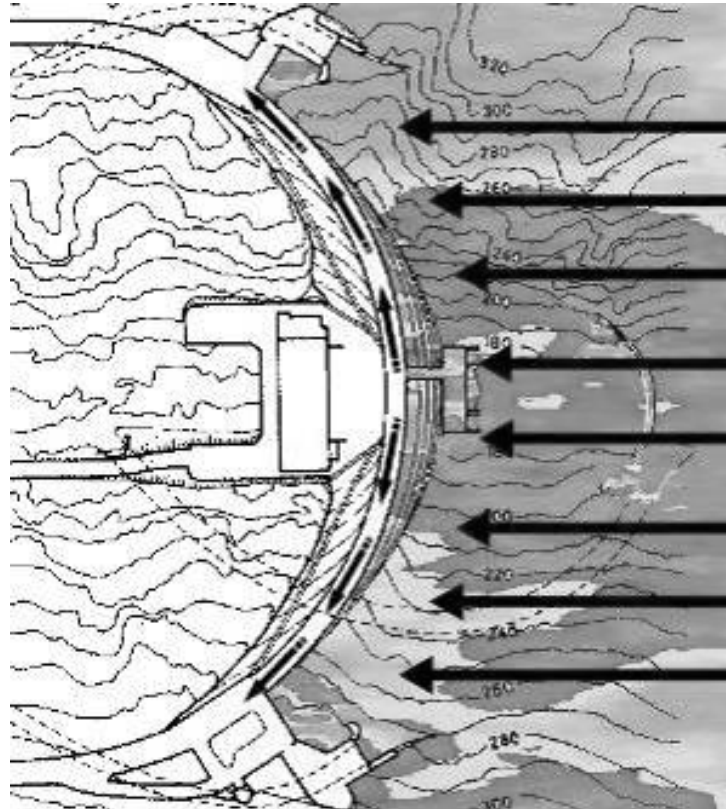


Figura 11 – Distribuição do impulso da água em barragens abóbada

A escolha do local destas barragens deve responder a vários critérios relacionados com a geometria do vale, as condições topográficas, a qualidade da rocha de fundação e dos encontros e as condições geológicas e geotécnicas. Quando a largura do vale a cotas elevadas for bastante acentuada ou se verificar uma menor qualidade do maciço de fundação pode recorrer-se a encontros artificiais para o apoio superior da abóbada.

Em vales largos e/ou em forma de U pode recorrer-se a uma solução de barragem em abóbadas múltiplas. Nestas o desenvolvimento total do vale é interrompido por contrafortes intermédios onde as abóbadas adjacentes descarreguem os esforços nelas actuates.

Em Portugal, cita-se como exemplo deste tipo de barragem, a barragem de Agueira no rio Mondego ilustrada na Figura 12, formada por três abóbadas, e a barragem de Odivelas na ribeira de Odivelas composta por cinco abóbadas.



Figura 12 – Barragem de Aguieira

A ideia de barragem abóbada, como elemento para suportar os impulsos produzidos pela água na albufeira, obedece à mesma ideia do conceito de arco, como elemento resistente as cargas normais a ele, já conceptualmente conhecido há muito tempo atrás. Comparando com as barragens de gravidade nas quais a própria massa da estrutura desempenha o papel fundamental nas tarefas resistentes, nas barragens abóbada procura-se uma forma de funcionamento totalmente distinta. Pretende conceber-se um tipo de estrutura, na qual, a repartição das tensões normais de compressão seja a mais favorável possível em conjugação com a necessidade de promover uma transferência de esforços com orientação adequada para o maciço de fundação, compatível com as suas características geológicas e geotécnicas. No comportamento estrutural de uma barragem abóbada em betão procura-se que as tensões sejam essencialmente de compressão e limitando-se o campo de tensões de tracção a zonas restritas da obra e com valores reduzidos, restringindo a utilização de armaduras a zonas muito localizadas da barragem.

Em geral, a definição de formas de uma barragem abóbada é efectuada a partir da análise das seguintes situações:

- Barragem em construção, onde esta não age ainda como uma estrutura monolítica e não existe o efeito de arco;
- Barragem construída com a albufeira vazia após a injeção de todas as juntas;
- Barragem construída com a albufeira cheia, considerando a pressão hidrostática da água.

A forma da barragem abóbada nasce de um compromisso resistente entre as três situações atrás descritas.

Facilmente se compreende que uma estrutura com esta complexidade geométrica, tenha representado um desafio para o seu cálculo. Anteriormente à aparição de computadores bem como de algoritmos numéricos adequados, o cálculo efectuava-se mediante hipóteses simplificadas que reduziam de forma drástica o problema. Os primeiros cálculos realizados limitavam-se a considerar unicamente a resistência dos arcos horizontais supondo-os como encastrados nos encontros e submetidos as cargas provenientes do impulso hidrostático da água na albufeira. Todavia, para ter em conta a possibilidade de que o encastramento não fosse perfeito, repetia-se o cálculo supondo com rotação livre nas extremidades, e dimensionava-se os arcos de modo a verificar que as tensões em ambas as hipóteses fossem aceitáveis. Como é lógico, este método não garantia a compatibilidade de deslocamentos entre os vários arcos horizontais consecutivos, pelo que proporcionava uma aproximação da solução muito primária.

Um avanço importante nesta área foi o método preconizado pelo suíço Stucky, que com ligeira alterações e alguns melhoramentos começou a ser usado na década de 60 do século passado, conhecido por “Trial Load Method”. Este método concebe uma estrutura formada por uma série de elementos horizontais (arcos) e verticais (consolas) ligados entre si, colaborando conjuntamente para a resistência. Assim, a acção da pressão hidrostática distribui-se pelos componentes horizontais e verticais. Deste modo, os impulsos actuantes sobre as consolas serão triangulares, evoluindo com a profundidade, e os impulsos sobre os arcos serão constantes em todo o seu desenvolvimento. Portanto, este método consiste em determinar a distribuição das cargas pelos arcos e pelas consolas, de modo a cumprir a condição de compatibilidade de deslocamentos nos pontos de intercepção dos arcos e consolas. A compatibilidade exigida poderá ser total ou parcial dependendo da precisão desejada. Este método constituiu uma ferramenta muito útil não só para o cálculo de barragens abóbada mas também para o seu dimensionamento. De facto, a sua aplicação prática permitia a análise do comportamento da estrutura, e estimar os efeitos que as alterações de forma produziam na redistribuição de esforços.

Os métodos acima referidos caíram praticamente em desuso com a aparição do método de elementos finitos, o qual passou a permitir análises estruturais mais abrangentes (em termos de acções e de propriedades dos materiais) e detalhadas (em termos de resultados). Este método permite também uma consideração mais realista da interacção da estrutura com o maciço de fundação assim como à água na albufeira (Canet, 1991).

Os elementos finitos utilizados para o cálculo de barragens abóbada são fundamentalmente de dois tipos:

- Elementos de casca, com 5 graus de liberdade por nó e representam a abóbada pela sua superfície média;
- Elementos finitos tridimensionais, com 3 graus de liberdade por nó, que permitem uma modelação detalhada da barragem e da sua fundação.

1.4. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Portugal é um dos países da União Europeia com maior dependência energética do exterior. Este facto tem implicações muito negativas no desempenho económico nacional, particularmente nos últimos anos em que a escassez dos recursos naturais, o aumento de fenómenos climáticos adversos e principalmente, a permanente instabilidade política a nível mundial, têm originado uma constante e expressiva oscilação do preço do petróleo, atingindo o preço do barril de crude valores incomportáveis.

Mas, a crise energética é ainda mais grave no país devido a que o consumo de energia cresce à média de cerca de 6 % ao ano, prevendo-se que continue a aumentar a um ritmo elevado, à medida que o país recupere o seu atraso económico em relação aos parceiros europeus. Este cenário, ampliado pela pressão de grupos ambientalistas contra a poluição provocada pelo uso de combustíveis fósseis, torna inevitável o recurso às energias alternativas e renováveis como a energia solar, eólica e hídrica.

Dada a necessidade de aumentar a capacidade de produção hídrica em Portugal, e com a entrada em exploração já em 2015 de novos aproveitamentos hidroeléctricos, é imprescindível ter em conta todas as possibilidades e qual a mais competitiva.

Assim sendo, dadas as características da construção de barragens abóbada em betão compactado com cilindros, tal como menor quantidade de trabalhos, maior velocidade de construção e menor custos, tornam esta solução numa hipótese viável a ter em consideração, pelo que neste trabalho com base em pesquisa bibliográfica, se faz um ponto da situação sobre esta técnica construtiva e sobre as análises estruturais específicas a elas associadas.

Numerosas barragens abóbada em BCC com dupla curvatura foram construídas nos últimos quatro anos na China. Até hoje, contabilizam-se pelo número de dezanove as barragens já construídas por esta técnica construtiva e dez em fase de construção, das quais quatro atingem alturas superiores a 100 metros, sendo que todas elas se localizam na China (Shengpei, 2007).

Dado o avanço verificado por parte da China nesta área, este trabalho está mais direccionado para os casos já existentes e construídos naquele país, pretendendo em primeiro lugar, colaborar para a divulgação e um melhor conhecimento deste no tipo de barragens, e contribuir para se fazer o ponto da situação desta técnica construtiva a barragens abóbada (“state of the art”).

Por fim, um dos objectivos do presente trabalho consiste na análise do comportamento de uma barragem abóbada em BCC em período de exploração, a barragem de Zhaolaihe construída na China.

1.5. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho, para além do presente capítulo de apresentação e introdução encontra-se dividido em quatro capítulos e dois anexos cujo conteúdo se refere seguidamente. Assim, no Capítulo 2 é feito um apanhado sumário sobre o desenvolvimento de barragens abóbada em BCC na China com a apresentação explicativa das obras mais figurativas. Neste serão também citadas as particularidades construtivas associadas a estas barragens, tais como o método de construção e a sua influência no comportamento estrutural da barragem, assim como a apresentação sucinta dos aspectos relativos a composição e mistura do betão compactado com cilindros.

No Capítulo 3 efectua-se uma exposição sobre o comportamento térmico de barragens de betão, em fase de construção e em fase de exploração. São descritos sucintamente os principais fenómenos que regem a evolução do estado térmico de uma barragem, os factores que a influenciam e as metodologias usadas para a sua análise. É apresentado um modelo para o cálculo das variações de temperatura em barragens abóbada na fase de exploração proposto por Zhu Bofang, especialista chinês de referência nesta matéria. O método exposto aplica-se também à análise do comportamento térmico de barragens abóbada em BCC, distinguindo-se o caso das barragens de pequeno volume que podem ser construídas na época fria e que não necessitam de arrefecimento artificial nem de juntas transversais, do caso das barragens que possuem juntas transversais re-injectáveis e que são projectadas admitindo o seu arrefecimento artificial. No Capítulo 4 simulou-se o comportamento estrutural de uma barragem abóbada em BCC chinesa já construída, com recurso ao método dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS. Considerou-se a barragem submetida, ao peso próprio, variações de temperatura, e

à pressão hidrostática da água presente na albufeira. São apresentados e analisados os principais resultados obtidos, nomeadamente os deslocamentos da estrutura e as distribuições de tensões principais para as combinações de acções mais relevantes para o comportamento da estrutura.

No capítulo 5 são resumidos os aspectos mais importantes que foi possível concluir ao longo deste trabalho, e tenta-se apontar ideias para futuros desenvolvimentos relacionados com os temas e questões abordadas.

Os resultados dos cálculos efectuados são apresentados em dois anexos. Assim no anexo A1 são apresentados, em tabelas, os resultados correspondentes às análises térmicas desenvolvidas no Capítulo 3. Por fim, no anexo A2, apresentam-se os resultados obtidos na análise estrutural efectuada com o programa ANSYS para a barragem analisada no Capítulo 4.

2

ESTADO DO DESENVOLVIMENTO DE BARRAGENS ABÓBADA EM BCC NA CHINA

2.1. INTRODUÇÃO

Desde a construção da barragem de Shapai com 130 metros de altura, ilustrada na Figura 13, a prática de barragens abóbadas em BCC progrediu intensamente na China. De facto, nos últimos seis anos, o número de barragens abóbada em BCC aumentou rapidamente, conforme evidencia a Tabela 2 onde constam as principais obras de referência construídas com esta tecnologia. Em 2004, inaugurou-se a primeira barragem abóbada realmente esbelta, a barragem de Zhaolaihe, com uma altura (H) de 107 m e uma espessura na base (B) de 18.5 m, a que corresponde uma relação $B/H= 0.18$ (Shengpei, 2007). Esta foi a barragem utilizada neste trabalho para efeitos de análise estrutural.

Também segundo a Tabela 2 é possível constatar que as barragens abóbada em BCC na China têm sido construídas em vales apertados, pois só em três casos se verificam relações L/H superiores a 3,30.



Figura 13 – Barragem de Shapai

Tabela 2 – Características das principais barragens abóbada de BCC chinesas (Shengpei, 2007)

Nome	Altura H (m)	Topo		Base B (m)	B/H	L/H	Volume de BCC	Juntas	
		L (m)	b (m)					Transversais	Induzidas
Pudding	75	196	6.3	22	0.37	2.20	125	1	2
Wenquanpu	46	187	5	14	0.29	3.20	55	2	2
Xibing	64	101	5	12	0.19	1.20	26	3 Juntas curta (montante)	
Hongpo	55	244	4.5	26	0.48	4.40	70	2	2
Shapai	132	250	9.6	28	0.24	1.80	365	2	2
Longshou	80	140	5	14	0.17	1.76	176	Periférica	
Shimenzi	109	177	5	30	0.27	1.30	190	Curta	
Linhekou	100	311	6	27	0.27	3.11	220	1	6
Zhaolaihe	105	198	6	18.5	0.18	1.89	180	2	3
Xiaqiao	68	212	6	22	0.32	3.14	67		2
Qinglianxi	96	178				1.86		2	2
Dahuashui	135	199	7	25	0.19	2.14	475	2 Periféricas	
Yujianhe	81	180	4	16.5	0.20	2.22	105	2	2
Liupo	70	258	6	21	0.30	3.68	140	2	3
Xuanmiaogu	80	242	4	16	0.25	3.04	75	1	2
Qilinguan	77	140	4.5	13	0.16	1.82	45	2	2
Longqiao	95	156	6	22	0.23	1.64	135	1	2
Maobaguan	66	120	5			1.80	80		2
Shaba	87	149	6	20	0.23	1.71	86		2
Bailianya	104	421	8	25	0.25	4.05	136	5	4
Huanghuazhai	118	247	6	25.5	0.21	2.10	276	2	3
Yunlonghe III	135	119	5.5	18	0.13	0.88	175		2
Luopo	114	191	6	20	0.18	1.68	182		4
Yunkou	119	152	5	18	0.16	1.27		1	2
Tianhuaban	113	160	6	24.2	0.22	1.42	175	1	2
Sai Zhu	72	160	7	14	0.19	1.60	90		2
Sanliping	133	285	5.5	22.7	0.17	2.14	420	2	3
Maduhe	99	250	6	17	0.18	2.51	210	2	3
Weihou	82	271	6.7	18	0.22	3.30	22	2	4

Neste capítulo, será feita uma abordagem dos problemas associados a esta nova tecnologia, ilustrados através de exemplos existentes e comparando com outras soluções possíveis tais como barragem gravidade de BCC ou barragem abóbada em betão convencional.

2.2. BARRAGENS ABÓBADA EM BCC VS BETÃO CONVENCIONAL

De entre as muitas diferenças entre barragens abóbadas em BCC e de betão convencional abordam-se neste capítulo as questões associadas com a composição específica do betão compactado com cilindros e com o método construtivo das barragens abóbada em BCC.

2.2.1. MISTURA E COMPOSIÇÃO

O BCC é um betão seco consolidado por vibração externa muito potente, efectuada através dos cilindros vibradores usados na compactação de solos. Este material difere do betão convencional não só no método de colocação mas também na consistência e na composição. De facto a consistência e a composição têm de permitir a circulação dos pesados cilindros na superfície do betão, com elevada energia de compactação pelo que o BCC assume características específicas, que são distintas das do betão convencional.

Não existe nenhuma definição simples e rigorosa sobre BCC. Existem, no entanto, na literatura algumas descrições sobre este betão que podem conduzir a interpretações erróneas sobre a sua natureza, como aquelas que apresentam o BCC como um material que se situa na fronteira entre os

solos e os betões. Esta forma de caracterizar o BCC sugere que se trata de um betão de inferior qualidade e não de um betão especial. O BCC é constituído pelo mesmo tipo de componentes que o betão convencional (BC) e a estrutura de produtos hidratados que lhe conferem coesão, resistência às tensões, impermeabilidade, durabilidade ou deformabilidade, são de natureza idêntica à existente no BC. Apresenta porém características diferentes do betão convencional e as condições de fabrico, transporte e compactação são também distintas (Ribeiro, 1998).

Existe actualmente uma tendência para se usarem betões com dosagens de ligante elevadas. Esta deve-se principalmente aos seguintes motivos: as amostras extraídas das estruturas onde se usaram maiores dosagens de ligante mostraram um bom comportamento do betão, no que se refere a resistência e estanqueidade e aumentaram a confiança neste material; o uso de BCC em barragens de maior dimensão exige a aplicação de betões com maior coesão e com mais elevada resistência à tracção; o uso de BCC em obras de importância crescente exige maiores níveis de segurança. Por outro lado, o uso de dosagens de cinzas volantes cada vez mais elevadas permite aumentar a dosagem de ligante no betão sem os problemas de elevação de temperatura que se observam nos betões em que o ligante é constituído exclusivamente por cimento (Dunstan, 2007).

Para barragens abóbada onde as exigências da resistência do material são mais elevadas, a redução de quantidade de cimento no BCC em relação a uma solução em BC deve ser limitada, verificando-se que uma redução da ordem de 20 % será adequada na maioria dos casos, com os respectivos efeitos benéficos na diminuição da produção de calor de hidratação do cimento (Carrère, 2006).

Outra aspecto relevante é a grande energia de compactação permitida pelos cilindros empregues na compactação do BCC, muito mais eficaz que os vibradores usados na compactação do betão convencional. Consequentemente, um nível igual ou superior de compactação pode ser obtido sem o excesso de água exigido para colocar o betão convencional. Assim é possível obter como resultado final, uma resistência maior com a mesma quantidade de cimento, ou a mesma resistência com menor quantidade de cimento.

Realça-se também o uso de dois materiais adicionais: o pó de pedra como filer e o Óxido de Magnésio (MgO) que têm vindo a ser aplicado com ênfase na China (Shen, 2003).

A aplicação de filer especialmente de origem calcária na mistura de BCC tem como objectivo, melhorar a sua trabalhabilidade e impermeabilidade. Na China, o teor óptimo de filer está definido, por especificação, em aproximadamente 17% da quantidade dos agregados, mas valores da ordem dos 20% já foram aplicados com sucesso em alguns projectos.

Porém, o teor de filer a acrescentar ao BCC depende das condições locais, das propriedades da rocha que constitui os agregados, da textura da areia, da granulometria, do módulo de finura e da quantidade de cimento.

As principais funções desempenhadas no BCC pelo filer são:

- Preencher os vazios entre agregados, melhorando assim, a trabalhabilidade, a compactação e diminuindo também o risco de segregação;
- Contribuir para melhores características de impermeabilidade do BCC;
- Poder substituir uma quantidade de cinzas no caso de possuir actividade.

Em termos médios, as principais alterações das propriedades do BCC devido ao uso de filer são:

- A resistência à compressão e à tracção do BCC mantêm-se sensivelmente iguais, podendo diminuir não mais de 3%;

- A retracção do betão com elevado teor em filer será maior, em cerca de 1% por cada 1% de quantidade de filer adicionado à mesma quantidade de água necessária para a hidratação do cimento, pelo que se recomenda, nestes casos, que se dê melhor cura ao betão;
- Se a quantidade de filer for muito elevada, ou seja maior que 22%, a consistência do betão e a resistência do BCC serão alterados, sendo por isso necessário acrescentar cimento para assegurar a resistência e consistência estipulados em projecto.

Os chineses têm também utilizado o óxido de magnésio (MgO) na mistura de BCC para compensar a contracção devido à descida de temperatura na massa de betão, e contribuir para reduzir o risco de fissuração. A sua aplicação efectua-se essencialmente através de dois métodos:

- O uso de cimento com elevado teor de óxido de magnésio (não superior a 5% por norma);
- Acrescentando óxido de magnésio à mistura durante a confecção do BCC.

No entanto, existem ainda dúvidas quanto ao comportamento do betão com óxido de magnésio, apesar de 20 anos de pesquisa em laboratório e dos casos recentes de aplicação mostrarem que a expansão (expansão) se mantém estável e se interrompe sozinha passado algum tempo. Aguarda-se, contudo, pelos resultados futuros do comportamento de obras nas quais se utilizou este material (Shen, 2003).

Têm sido utilizados diferentes métodos para o estabelecimento de dosagens de BCC, por todo o mundo, com o objectivo de formular uma mistura que, satisfazendo os requisitos de funcionalidade e segurança, seja a mais económica possível, com uma quantidade máxima de agregados e uma quantidade mínima de cimento, compatíveis com as propriedades desejadas. Estas misturas devem garantir uma granulometria adequada dos agregados, uma quantidade mínima de ligante e recorrer a pozolanas, essencialmente cinzas volantes, e dar origem a um betão com abaixamento zero e consistência adequada à compactação com cilindros.

A China tem desenvolvido métodos de mistura que se adequam a qualquer tipo de obra, para se garantir uma boa ligação entre camadas no caso de barragens gravidade, ou para garantir a estanqueidade e impermeabilidade bem como a resistência necessária para o caso das barragens abóbada. As principais propriedades das misturas utilizadas em barragens chinesas são as seguintes:

- O uso generalizado de cinzas volantes;
- A percentagem de cinzas volantes na quantidade de ligante pode alcançar os dois terços, sendo directamente influenciada pelo tipo de cimento e de cinzas;
- A relação água/cimento situa-se geralmente entre 0.5 e 0.7;
- Utilização de misturas “2-grade RCC” com duas graduações de agregado, cuja dimensão máxima do agregado é de 40 mm, com uma relação de 1:1 ou de 1:1.4; esta mistura é a mais adequada a construção de barragens abóbada;
- Utilização de misturas “3-grade RCC” com três graduações de agregado, cuja dimensão máxima do agregado é de 80 mm, com uma relação de 4:4:3 ou de 3:4:3; esta mistura é a mais utilizada em barragens do tipo gravidade;
- A utilização de aditivos para aumentarem a trabalhabilidade do betão ou também para aumentar o tempo disponível entre cada camada sem necessidade de recorrer a uma junta fria (“cold joint”), junta com necessidade de um tratamento especial para melhorar a ligação entre camadas caso se ultrapassa esse tempo (“setting time”).

Também na China, as classes de resistência do BCC estabelecidas com base no valor da resistência à compressão aos 90 dias, encontrando-se referências às classes $R_{90}10$, $R_{90}15$ e $R_{90}20$ (resistência à compressão de 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, respectivamente, aos 90 dias).

Existe no BCC a necessidade de avaliar a resistência das juntas horizontais de ligação entre camadas, que têm sido apontadas como o principal inconveniente das barragens de BCC, dado o elevado número de juntas e a necessidade de não se ultrapassar demasiado tempo entre camadas. No entanto, as amostragens retiradas em algumas obras mostram que não são visíveis as juntas de betonagem, e os testes efectuados em laboratório indicam que a resistência ao corte das juntas frias (com a realização dos tratamentos adequados) é ligeiramente inferior ao das juntas quentes, conforme mostra a Tabela 3 (Shengpei, 2007).

Tabela 3 – Resistência ao corte entre camadas em duas barragens com mais de 200 m de altura (Shengpei, 2007).

	Tipo de junta	Projecto	Resistência	f'	c' (Mpa)	Comentário
Ensaio in-situ de Resistência ao Corte	Junta Quente	Guangzhao	$R_{90}20$	1.27	1.35	2-grade RCC
			$R_{90}20$	1.02-1.20	1.02-1.40	3-grade RCC
		Longtan	$R_{90}15$	1.26-1.74 (1.42)	1.38-2.82 (1.61)	3-grade RCC
			$R_{90}20$	1.54-2.34 (1.74)	3.26-2.30 (2.78)	
	Junta Fria	Guangzhao	$R_{90}20$	1.17-1.26	1.26-1.19	Limpeza + argamassa de ligação
			$R_{90}20$	1.38-1.42	2.85-2.45	Limpeza + argamassa de ligação
		Longtan	$R_{90}20$	1.32-1.40	2.31-2.23	Limpeza + colocação de uma camada com 1-grade RCC

f' - coeficiente de atrito c' - resistência da ligação

2.2.2. PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO TÉRMICO

Os processos e o programa de construção usados influenciam o campo térmico que se desenvolve no corpo de uma barragem. De entre os factores mais influentes relacionados com os métodos de construção, podem citar-se o espaçamento das juntas, o tipo de cofragem usada e o tempo que se mantém colocada, o ritmo de betonagem, ou seja, a espessura das camadas de betonagem e o intervalo de tempo entre a sua colocação na obra, e o controle da temperatura do betão, conseguido através do uso de cimentos especiais, do arrefecimento prévio dos materiais constituintes do betão e do arrefecimento artificial, posteriormente à betonagem (Silveira, 1961).

Os métodos para a previsão do campo de temperaturas em fase construtiva e de exploração de barragens abóbada em BCC e em BC são similares. No entanto devido à alteração do esquema de colocação de betão, o campo de temperaturas e os esforços térmicos associados aos dois métodos são obviamente diferentes.

Nas barragens em abóbada convencional o betão coloca-se por blocos separados por juntas transversais (Figura 14), sendo estas juntas de contracção injectadas a uma baixa temperatura conseguida por refrigeração artificial da massa do betão (pós-refrigeração), passando a formar uma estrutura que funciona monoliticamente.

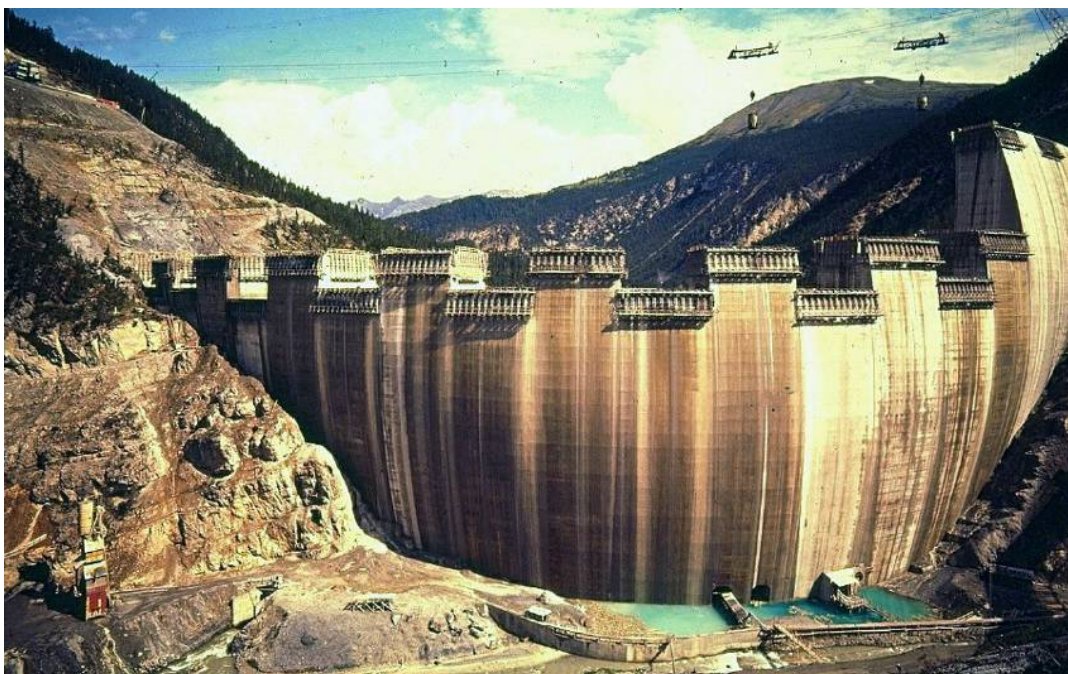


Figura 14 – Barragem abóbada em betão convencional (“Cold Arch”)

No caso das barragens abóbada em BCC que são construídas por camadas horizontais como se ilustra na Figura 15, em princípio de margem a margem, a monolitização está sempre presente, servindo as juntas transversais (geralmente do tipo induzido) e a pós-refrigeração em massa (quando existe) para controlar eventuais fissurações. Devido ao elevado ritmo de colocação e ao efeito das cinzas utilizadas como ligante, o arrefecimento da barragem é mais lento sendo necessário vir a efectuar a re-injecção das juntas para garantir a manutenção da monolitização da estrutura. Em suma, pode dizer-se que o campo de tensões de origem térmicas em barragens abóbada em BCC é de maior complexidade do que nas barragens abóbada convencionais (Shengpei, 2007).

Com base no funcionamento em arco, anota-se que na terminologia chinesa se encontra a designação de “Warm Arch” para as barragens abóbada em BCC, em contraponto com a designação de “Cold Arch” para as barragens abóbada em BC.



Figura 15 – Barragem abóbada em BCC (“Warm Arch”)

2.3. JUNTAS E INJEÇÃO

Dividir a estrutura em “arcos” através da formação de juntas é o factor chave para melhorar o campo de tensões de origem térmica no dimensionamento de barragens abóbada.

Dois tipos de juntas estruturais são geralmente adoptadas. As primeiras consistem nas juntas estruturais transversais aos arcos realizadas pelos processos convencionais e nas juntas induzidas, sendo estas as mais usadas na maioria das barragens abóbada já concluídas. As segundas são as chamadas juntas curtas ou interrompidas que são colocadas em zonas estratégicas onde se prevejam campos de tracções com valores superiores aos admissíveis; podem situar-se a montante ou a jusante, e o betão envolvente é provido de armaduras de reforço, tal como foi adoptado nas barragens de Xibing e Shimenzi (Shen, 2007).

Uma barragem abóbada em BCC de pequenas dimensões, que possa ser construída durante os meses de baixa temperatura (Inverno), apresenta tensões que geralmente se enquadram nos padrões permitidos. Nestas circunstâncias as juntas poderão ser dispensadas, adoptando-se apenas por prevenção juntas induzidas. Contudo, se o betão for colocado em meses de mais calor (Verão) as tensões de origem térmica poderão ser significativas e originar o aparecimento de fissuração na barragem.

No caso de uma barragem de maiores dimensões, que não pode ser unicamente construída nos meses de Inverno, e em que a colocação de betão tem também de ser efectuada no período quente (existiria alternativa de interromper a construção no período quente, construindo a barragem em dois Invernos), deve ser estudada a colocação de juntas estruturais tendo em conta o ritmo de colocação de BCC e os demais parâmetros que condicionam a evolução térmica da barragem em fase construtiva.

Assim, uma dificuldade capital no projecto de barragens abóbada em BCC consistiu na implementação e concepção de juntas eficazes e métodos de arrefecimento para eliminar o impacto indesejado resultante do calor de hidratação no período construtivo. O avanço fundamental nesta área foi dado na

construção da barragem de Shapai, na qual foram concebidas, em fase de projecto, técnicas “inovadoras” para a realização de juntas e para o arrefecimento artificial da barragem, resolvendo deste modo o problema chave no dimensionamento de barragens abóbadas em BCC de grandes dimensões. A primeira consiste em definir juntas transversais mediante o recurso à utilização de blocos de betão pré-fabricados, e a segunda resume-se a dispor serpentinas de arrefecimento, constituídas por tubos de polietileno de alta densidade embebidas estrategicamente no BCC. Anota-se que a adopção de serpentinas em tubos metálicos é uma tecnologia adoptada desde há muito para a pós-refrigeração de barragens abóbada em betão convencional, mas ainda não tinha sido utilizada em barragens BCC.

2.3.1. FORMAÇÃO DAS JUNTAS

Em princípio, o plano das juntas deve ser normal à direcção das maiores tensões de tracção devidas as variações de temperatura ou a outras causas. A experiência em barragem de betão convencional consagrou que deverão existir juntas transversais e longitudinais, formando um conjunto de blocos prismáticos com secção aproximada de 15×15 metros em barragens de grande espessura cuja temperatura não é controlada. No entanto, se a temperatura for controlada, isto é, se se usarem métodos de arrefecimento antes e depois da betonagem, de tal forma que a temperatura não suba acima de certos limites, é possível espaçar as juntas longitudinais bastante mais do que os 15 metros, até valores do triplo deste, visto que, uma vez a barragem construída, as variações de temperatura da sua massa serem muito reduzidas. É porém duvidoso que numa barragem de pequena espessura, seja possível usar espaçamentos das juntas transversais superiores a 15 metros, mesmo que se use arrefecimento artificial, visto que as variações de temperatura se fazem sentir fortemente na sua massa (Silveira, 1961).

Nas barragens abóbada em BCC o problema das tensões de origem térmica é proeminente. Por este motivo surgiu a necessidade de estudar medidas adequadas para a formação de juntas em barragens abóbada em BCC com o intuito de prevenir a formação de fissuras produto da variação térmica, e assegurar o monolitismo e segurança da barragem. Por outro lado a materialização das juntas não deve também impedir, ou prejudicar significativamente, a compactação por via de cilindros em todo o seu desenvolvimento para não comprometer e reduzir o ritmo de colocação do betão em obra.

Segundo a metodologia chinesa, deve-se iniciar a colocação de BCC nos meses de inverno, colocando uma quantidade máxima possível de betão nessa estação, até atingir uma altura H , sem a utilização de juntas, como ilustra a Figura 16 (Bofang, 2003).

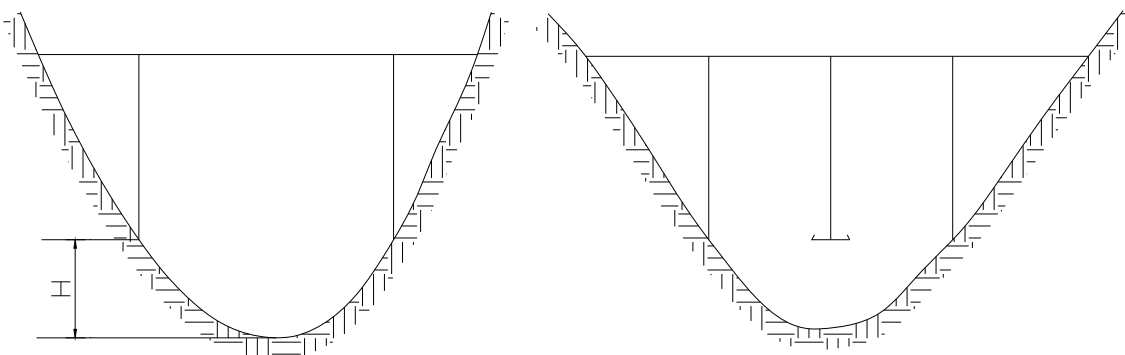
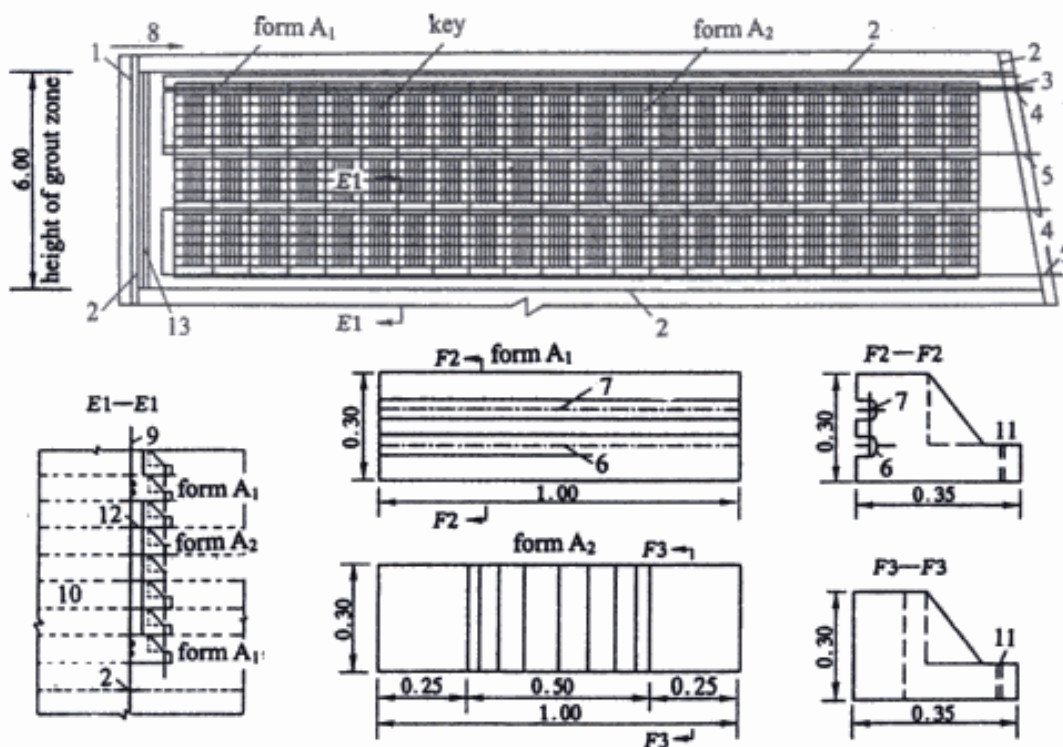


Figura 16 – Juntas transversais (Bofang, 2003)

Com este procedimento, será unicamente necessário colocar juntas transversais acima da altura H, devido as grandes variações térmicas existente entre o corpo da barragem e o exterior nesta fase de construção.

Quando se utiliza a técnica de BCC, devida a menor quantidade de calor de hidratação libertado, a distância entre juntas transversais pode ser superior à distância entre juntas habitualmente utilizada nas barragens convencionais. Dependendo do comprimento da barragem medido no arco do coroamento, podem existir entre 1 a 4 juntas transversais, tal como se indicou na Tabela 2 relativa às principais obras de referência. Também como se ilustrou esquematicamente na Figura 16, poderá haver reforços com armadura abaixo do início da junta, na ligação ao betão, que terão o objectivo de impedir o prolongamento da junta durante o período de arrefecimento da barragem.

Para a concepção das juntas foi proposto a utilização de blocos pré-fabricados de betão, ideia que, conforme já referido, foi desenvolvida e realizada na construção da barragem abóbada de Shapai. Tal como se apresenta na Figura 17, as juntas transversais formam-se com uma série de blocos pré-fabricados com o comprimento de 1 metro e altura de 0.30 m, que geralmente se adopta para a espessura de camada de BCC. A altura da zona de injeção é de 6 metros e utilizam-se dois tipos de blocos (A1 e A2). No processo de construção da barragem, os blocos pré-fabricados colocam-se antes da deposição do BCC, não prejudicando desta forma o ritmo de construção.



The transverse joint of Shapai RCC arch dam (unit: m). 1 – water stop; 2 – grout stop; 3 – air exhaust pipe; 4 – grout return pipe; 5 – grout inlet pipe; 6 – hole for installing grout pipe; 7 – hole for installing air exhaust pipe; 8 – direction of river; 9 – plane of transverse joint; 10 – layer of concrete; 11 – hole for fixing bar; 12 – mortar; 13 – cavity leading to open.

Figura 17 – Junta transversal da Barragem de Shapai (Bofang, 2003)

A evolução da técnica levou à implementação de novos tipos de blocos apresentados na Figura 18, com a possibilidade de re-injeção das juntas e da formação de juntas transversais e induzidas.

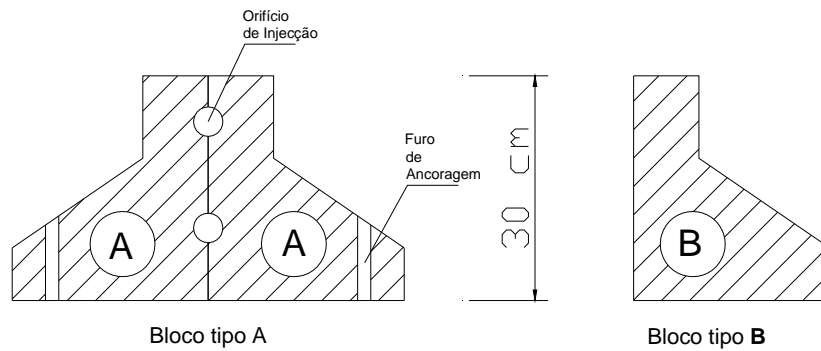


Figura 18 – Blocos pré-fabricados de betão (Shengpei, 2007)

Tal como mostra a Figura 19, a formação das juntas transversais efectua-se pela sobreposição de um bloco do tipo A, com dois blocos do tipo B, e assim sucessivamente, dividindo a barragem em dois volumes separados por uma superfície com atrito quase nulo. Para criar juntas induzidas, introduz-se um bloco do tipo A entre a formação de cada duas camadas sucessivas de betão de modo a induzir o aparecimento de fissuração por esta superfície caso se ultrapassa a resistência à tracção do betão nalguma secção próxima.

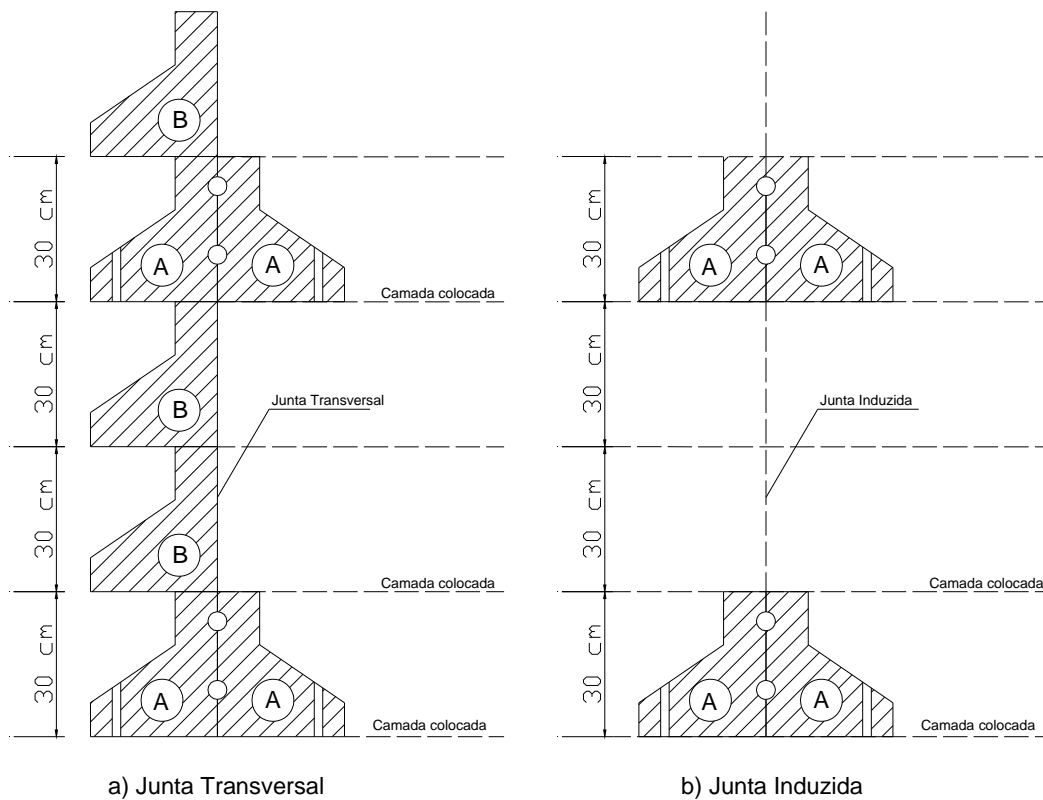


Figura 19 – Formação de Juntas (Shengpei, 2007)

Assim, na construção de barragens de BCC, as juntas também podem ser induzidas mediante indutores de juntas ("crack inducers"), ou são cortadas após a betonagem de cada camada ou mesmo após a construção de várias camadas. Os indutores de juntas permitem efectuar um corte transversal da barragem reduzido assim o comprimento efectivo de 60% a 75%.

As juntas induzidas não abrem se não houver tensões de tracção superiores às admissíveis na secção, e inversamente, a junta pode abrir controlando assim a abertura de fissuras na barragem. Caso a posição da junta induzida não for adequadamente escolhida podem aparecer fissuras noutra secção da barragem e as juntas induzidas não trabalhem, tal como aconteceu na barragem de Puding. No entanto, com a acção simultânea da pressão hidrostática e das variações térmicas anuais, o esforço axial instalado no arco é geralmente de compressão excepto na parte superior da barragem, havendo tensões de tracção a jusante e de compressão a montante, tornando-se impossível a abertura total da secção da junta. Portanto, a acção das juntas induzidas é diferente da acção das juntas transversais que são devidamente injectadas após o arrefecimento da barragem estar completado. As juntas induzidas só devem ser utilizadas como medidas auxiliares e não como medidas principais de controlo de fissuração de barragens (Bofang, 2003).

2.3.2. ARREFECIMENTO E INJEÇÃO

Antes da injeção das juntas transversais deve proceder-se ao arrefecimento da barragem até ao valor definido para a temperatura de injeção, sabendo que esta temperatura não pode ser superior à temperatura média anual da barragem no período de exploração. O arrefecimento é efectuado pela circulação de água refrigerada em serpentinas que, durante a construção, foram dispostas na parte superior da camada de BCC e antes da colocação da camada seguinte.

Nas barragens abóbada em BCC construídas na China, a utilização de serpentinas de PVC tem-se mostrado mais adequada do que o recurso às usuais serpentinas de metal, pois o PVC tem menos conexões a efectuar, e sendo mais flexível pode ser instalado facilmente antes da colocação do betão. A utilização deste recurso permite geralmente reduzir de 4 a 6 °C os aumentos de temperatura no corpo da barragem (Shengpei, 2007).

No caso em que uma albufeira possa vir a ser esvaziada durante o período de operação, poderá ser viável evitar o recurso à instalação de serpentinas e à refrigeração do betão da barragem após a construção, beneficiando desse esvaziamento (ou rebaixamento do nível da albufeira) para a re-injeção das juntas transversais após o arrefecimento natural do corpo da barragem. Contudo, nesta hipótese, deve-se garantir a não ocorrência de tensões de tracção de valor não admissível durante o período de arrefecimento natural, resultante do nível elevado da água e da respectiva pressão hidrostática, que possam originar fissurações e agravar o estado de tensão na barragem.

2.4. OBRAS DE REFERÊNCIA

Os especialistas chineses iniciaram-se na investigação de barragens abóbada em BCC em 1988, antes da construção das primeiras duas barragens realizadas na África do Sul. Esta contribuição só se tornou real em 1993 com a construção das duas primeiras obras de referência, a barragem de Puding com 75 m de altura construída na província de Guizhou e a barragem de Wenquanpu com 49 m de altura construída na província de Hebei. Estas duas obras possibilitaram a China colectar e enriquecer a sua experiência nesta técnica, necessária para construção de obras de maior dimensão, com alturas superiores a 100 m como é o caso da barragem de Shapai com uma altura de 129 m, e a barragem de

Shimenzi com 109 m de altura, ambas inauguradas em 2001 seguindo-se o desenvolvimento desde então de novas barragens efectuadas através desta metodologia.

A seguir nesta secção será feita uma breve apresentação de algumas das obras já realizadas onde se descreve as principais particularidades de cada uma, assim como uma referência à barragem de Picada no Brasil, que incorporou um bloco experimental com intuito de estudar a construção e comportamento estrutural de barragens abóbada em BCC.

2.4.1.1. Barragem de Puding

A barragem de Puding na Figura 20, foi a primeira barragem em arco construída com a técnica de BCC na China e a impulsionadora da propagação desta tecnologia. A sua forma é definida por arcos circulares de centro fixo, com variação dos raios e da abertura dos arcos. A estrutura de Puding é assimétrica transversalmente e longitudinalmente, tendo o arco do coroamento um desenvolvimento longitudinal de 165.67 m. A estrutura não dispõe de nenhuma junta de contracção, tendo contudo sido introduzidos dois indutores de juntas que dividem a estrutura em três zonas com 55, 80 e 30.67 m de desenvolvimento. Como regra geral para simplificar a construção das barragens de BCC, também nesta obra a central hidroeléctrica e o respectivo circuito hidráulico é independente da barragem. O descarregador está inserido no coroamento da barragem.

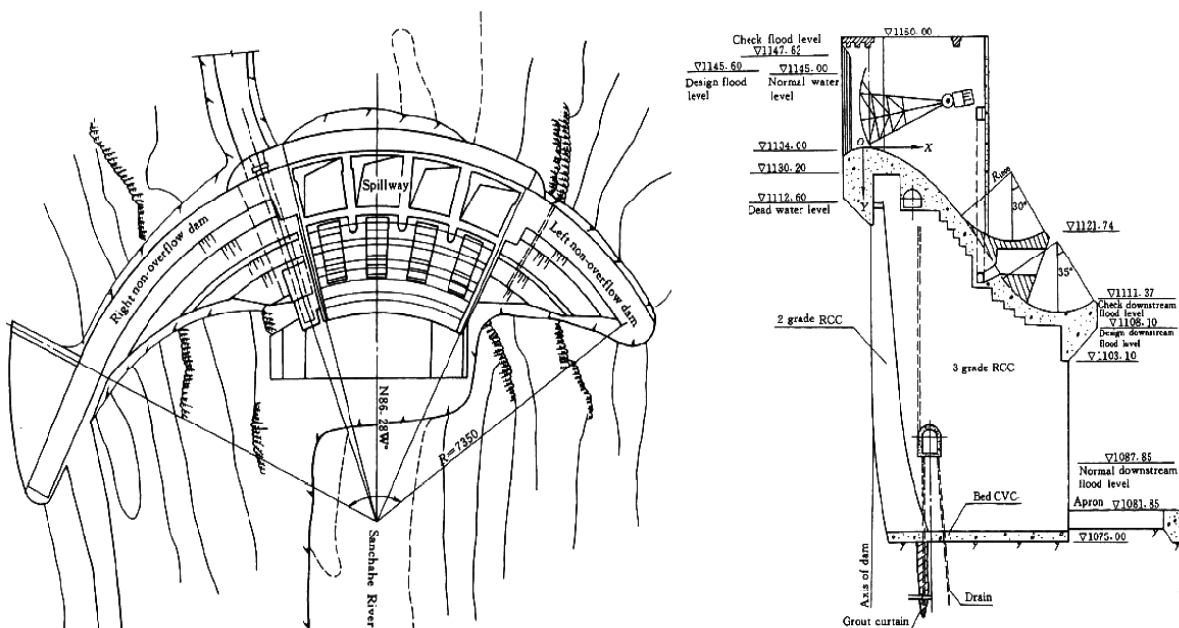


Figura 20 – Barragem de Puding (Shen, 2007)

Após o primeiro enchimento da albufeira até a cota 1133.7 m em 1993, verificaram-se infiltrações importantes no corpo da barragem que inundaram a galeria na cota 1090 m. Tal obrigou a reparação desta fuga através da injeção das fissuras a partir da galeria superior.

Apesar deste episódio, até agora a obra tem estado em funcionamento normal, tendo sido continuamente inspeccionada e não foram reportadas fissurações dignas de relevo (Shen, 2007).

2.4.1.2. Barragem de Shapai

A Barragem em arco de Shapai na Figura 21, com 130 m de altura, foi a primeira obra deste tipo a atingir uma altura superior a 100 m. O arco do coroamento tem 250 m de desenvolvimento e os trabalhos de construção em BCC foram concluídos em 17 meses. Esta estrutura apresenta já uma evolução no método de construção comparativamente com a barragem de Puding, como a utilização de um sistema de impermeabilização inovador que consiste em enriquecer o BCC junto ao paramento de montante adicionando manualmente cimento utilizando vibração interna. Esta barragem apresenta duas juntas transversais e duas juntas induzidas. O espaçamento entre as juntas induzidas é de 68 m no arco de coroamento.

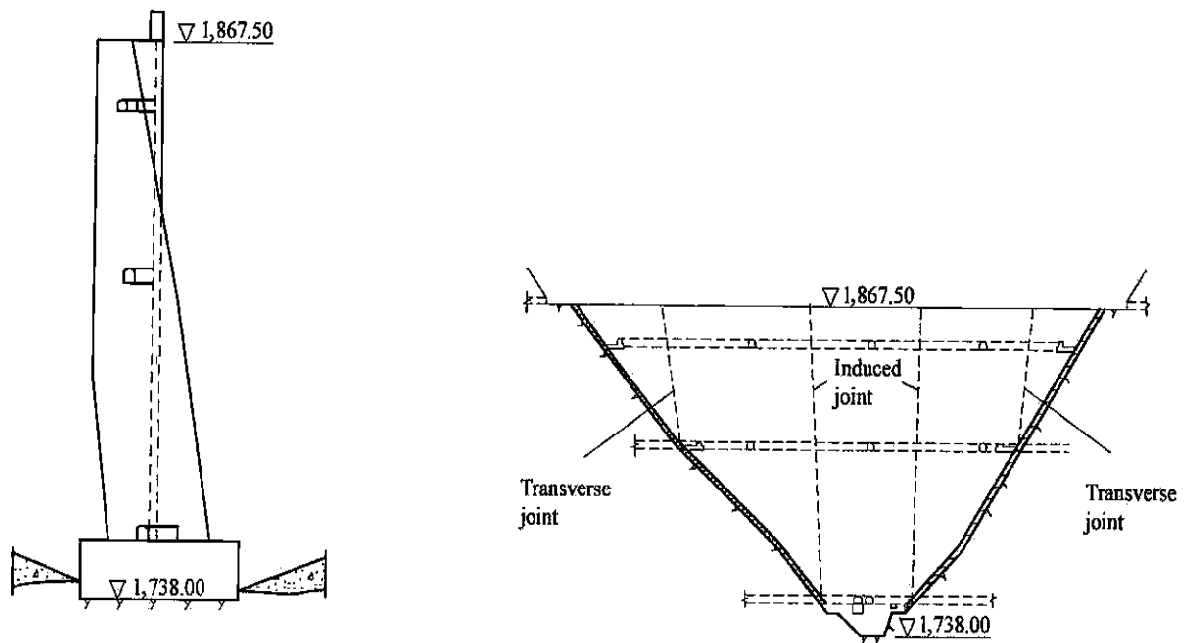


Figura 21 – Barragem de Shapai (Shengpei, 2007)

Após o primeiro enchimento da albufeira, dado a temperatura média anual do local se situar nos $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura do corpo da barragem continuou a descer, provocando a abertura das juntas transversais. Esta situação já prevista levou a implementação de uma tecnologia de injeção das juntas com possibilidade de re-injeção anteriormente apresentada. Assim a descida de temperatura no corpo da barragem provocando a abertura das juntas transversais foi resolvido com sucesso pela injeção repetida das juntas, até se atingir o regime estacionário na barragem. Esta realização permitiu confirmar que o sistema de injeção/re-injeção contínuo funciona e é eficaz.

O sistema de estanqueidade adoptado revelou-se bastante eficaz registando-se apenas uma fuga inferior a 1 l/s .

Até hoje, a barragem não apresenta fissuração. As tensões máximas de tracção na barragem são de 0.51 MPa e 0.75 MPa a montante e a jusante, respectivamente (Shengpei, 2007).

2.4.1.3. Barragem de Shimenzi

A barragem de Shimenzi na Figura 22, caracteriza-se por estar situada numa região cujo clima é muito frio com 130 dias de Inverno onde se atingem temperaturas negativas e uma temperatura média anual do ar de 4.1 °C. A amplitude anual da variação de temperatura é de aproximadamente 60 °C, dado a temperatura máxima ser de 33.2 °C no Verão e a temperatura mínima atingir 31.5 °C negativos no Inverno, verificando-se também uma grande variação de temperatura diária.

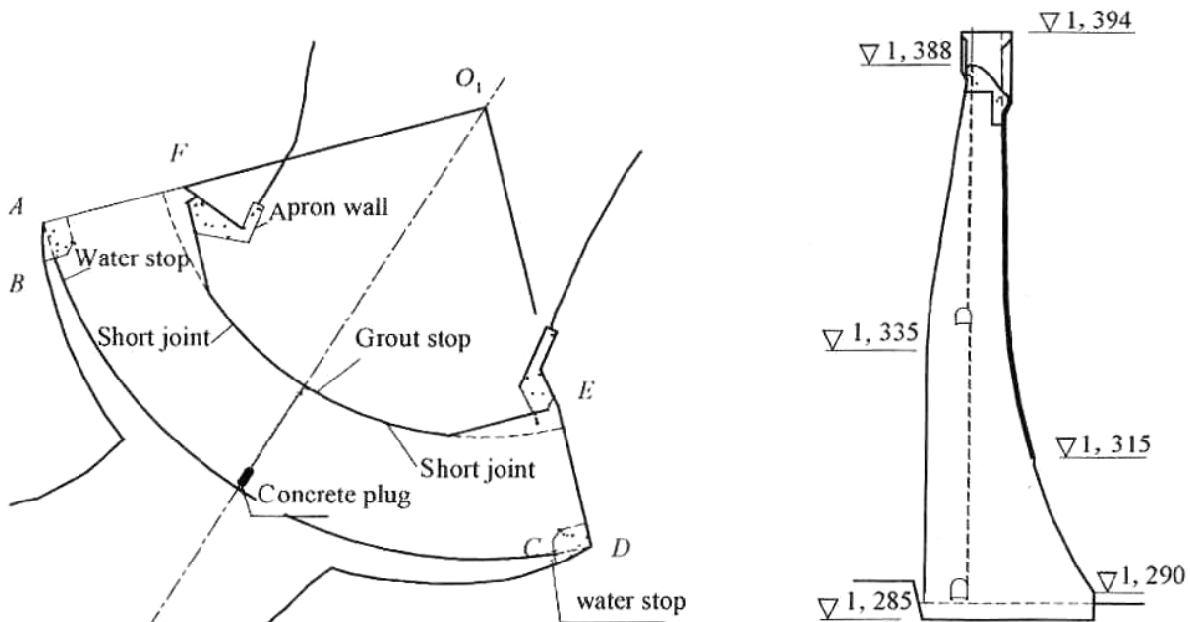


Figura 22 – Barragem de Shimenzi (Shen, 2007)

Esta foi a primeira realização de uma abóbada em BCC com dupla curvatura. Apresenta uma altura máxima de 109 m e um desenvolvimento do arco de coroamento de 177 m. Para além de submetida a um clima severo esta barragem está situada numa zona sísmica de grau elevado e o seu maciço de fundação tem fracas qualidades geológicas.

Nesta obra não se recorreu a juntas transversais, tendo-se apenas adoptado juntas interrompidas no paramento de montante junto aos encontros e no paramento de jusante no fecho, ou seja, em zona onde se previam tensões de tracção induzidas pela pressão hidrostática e pelas variações de temperatura. A utilização destas juntas revelou-se eficaz para a diminuição das tensões de tracção, permitindo passar de 4.7 MPa valor alcançado sem juntas para 1.1 MPa recorrendo ao uso de juntas interrompidas. Após a conclusão da obra verificou-se, a partir da medição das tensões na extremidade das juntas interrompidas que o estado de tensão está nos limites impostos no dimensionamento.

No contacto com a fundação foram entrepostas juntas perimetrais com “water stop” como se ilustra na Figura 23.

Realça-se também a utilização do “concrete plug” colocado junto ao fecho no paramento de montante que permite o enchimento do furo após o arrefecimento da barragem com betão expansível, para induzir um estado de compressão antes do enchimento da albufeira (Shengpei, 2007).

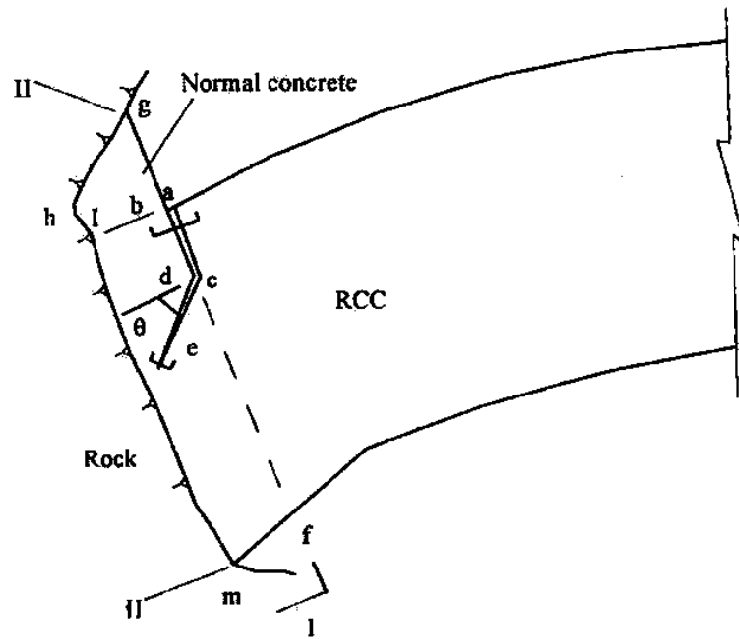


Figura 23 – Junta perimetral (Shen, 2007)

2.4.1.4. Barragem de Dahuashui

O complexo hidroeléctrico de Dahuashui apresentado na Figura 24 localiza-se na província de Guizhou, é composto por uma barragem abóbada e outra de gravidade, ambas em BCC tendo sido este concluído no espaço de 31 meses. Esta composição deve-se ao facto do maciço rochoso de fundação no encontro esquerdo da barragem ter-se revelado de má qualidade.

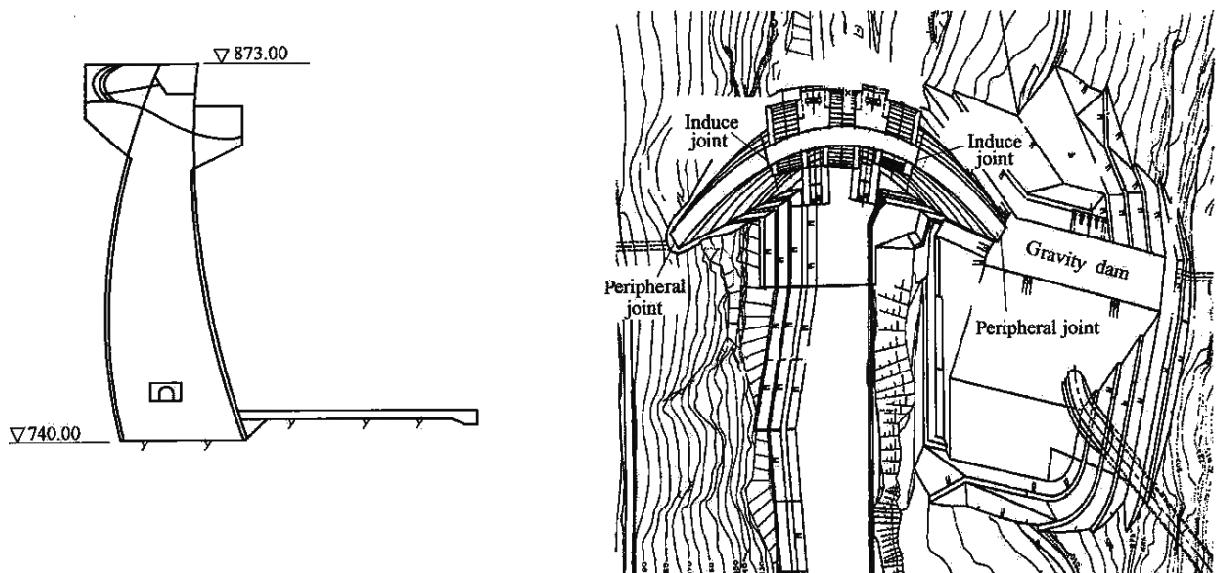


Figura 24 – Barragem de Dahuashui (Shen, 2007)

A barragem abóbada de BCC é a mais alta até à data, com uma altura máxima de 134.5 m, tendo uma largura que varia de 25 m na base até 7 m no arco de coroamento. A razão da base com a altura é de 0.186 o que mostra bem a evolução que esta técnica sofreu desde a sua primeira realização com a barragem de Puding, a qual tinha uma razão base/altura cerca de duas vezes superior, com 0.37.

O desenvolvimento do arco de coroamento é de aproximadamente 198 m. A barragem tem duas juntas induzidas e juntas perimetrais no contacto com a fundação. Os descarregadores de cheia são constituídos por três vãos inseridos no coroamento e dois na zona central incorporados no corpo da barragem.

A barragem gravidade que se situa no encontro esquerdo tem uma altura máxima de 73m e um comprimento de 89.1 m, atingindo um volume de 600000 m³ de BCC.

A construção desta obra destaca-se pelo elevado ritmo de colocação imposto para concluir a barragem nos prazos definidos. Os trabalhos de betonagem iniciaram-se com uma elevação de 15 m entre 7 e 27 de Abril de 2005, altura necessária para o controlo de cheias. Em Junho de 2005 efectuou-se uma pausa nos trabalhos de betonagem por causa do período de cheias e inundações, retomando-se a construção em Novembro de 2005 com a colocação contínua de betão atingindo uma elevação recorde de 33.5 m nesse mês. Na Figura 25 ilustra-se com fotografias a evolução do ritmo dos trabalhos da barragem de Dahuashui (Sinohydro, 2007).



Janeiro de 2006



Maior de 2006



Novembro de 2006 conclusão dos trabalhos em BCC



Barragem concluída

Figura 25 – Evolução dos trabalhos na barragem de Dahuashui (Sinohydro, 2007)

Não foi tido em conta nenhuma medida para o controlo da temperatura de colocação do betão em obra, a qual depende da temperatura do ar caso não se usem processos de arrefecimento dos materiais constituintes do betão. No entanto, utilizou-se um sistema de serpentinhas, afastadas de 1.5 m em altura para o arrefecimento do betão com a água do rio.

Após a construção verificou-se o aparecimento de 26 fissuras, das quais 16 ocorreram na barragem abóbada e as restantes na barragem gravidade, sendo que algumas fissuras atravessaram a secção entre montante e jusante. Estas fissuras resultaram directamente da negligência do controlo de colocação de betão em obra e da falta de eficácia do arrefecimento da barragem com a água da albufeira que se revelou insuficiente, levando que em algumas zonas se atingissem temperaturas de 40° C, superior ao valor admissível definido em projecto.

Adicionalmente, apresenta-se na Figura 26 o paramento de jusante onde é visível a curvatura em planta e na vertical desta barragem.



Figura 26 – Paramento de jusante da barragem de Dahuashui

2.4.1.5. Barragem de Picada

A barragem de Picada do tipo gravidade, apesar de construída no Brasil de acordo com um projecto convencional de BCC, é uma obra que interessa citar pois durante a sua construção incorporou um bloco experimental visando estudar a construção e o comportamento estrutural de barragens abóbada com dupla curvatura em BCC, tal como se ilustra na Figura 27.

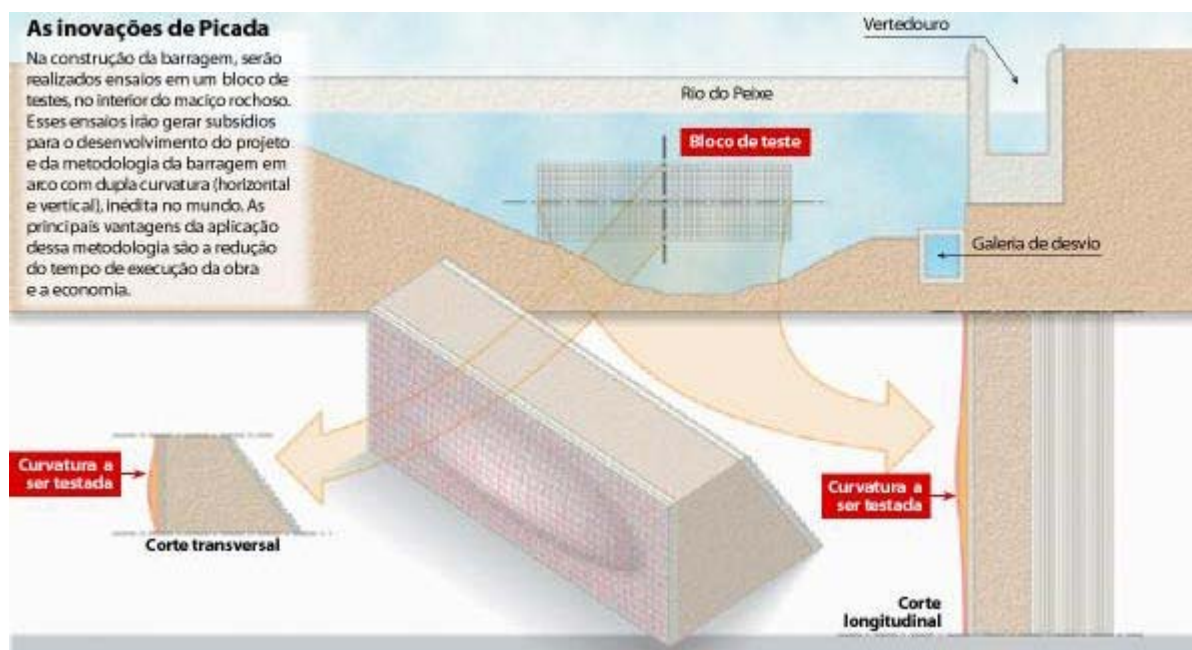


Figura 27 – Barragem de Picada (tirado de <http://www.odebrechtonline.com.br>)

Este bloco experimental teve como objectivo adaptar a tecnologia do BCC à construção de barragens abóbada para resolver problemas tais como:

- A formação de juntas transversais, ligada aos problemas associados a injeção das juntas bem com evitar a descontinuidade do arco pelo aparecimento de fissuras;
- Obter uma resistência do BCC adequada as barragens abóbada;
- A formação do arco com dupla curvatura.

Com esta finalidade tentou-se implementar os seguintes aspectos construtivos (Stucky, 2006):

- Executar juntas transversais de forma contínua e bem delimitada, com possibilidade de injeção, sem perturbação dos ritmos de colocação de BCC e espaçadas de 20 a 30 m (Figura 28);
- Proceder ao pós-arrefecimento da barragem e monitorizar as temperaturas no corpo da barragem;
- Proceder à injeção das juntas transversais;
- Efectuar o tratamento especial da ligação entre camadas horizontais para melhorar a resistência ao corte;
- Adoptar betões com maior resistência à compressão, cerca de 35 a 40 MPa (Figura 28), e impermeáveis;
- Utilizar cofragens que se adaptam à forma em dupla curvatura da barragem.

Por fim, realça-se que os autores deste estudo conseguiram, num curto bloco experimental, realizar e monitorizar todos os aspectos relevantes relacionados com a construção de barragem abóbada em BCC, para poder futuramente vir a aplicar esta técnica com sucesso.

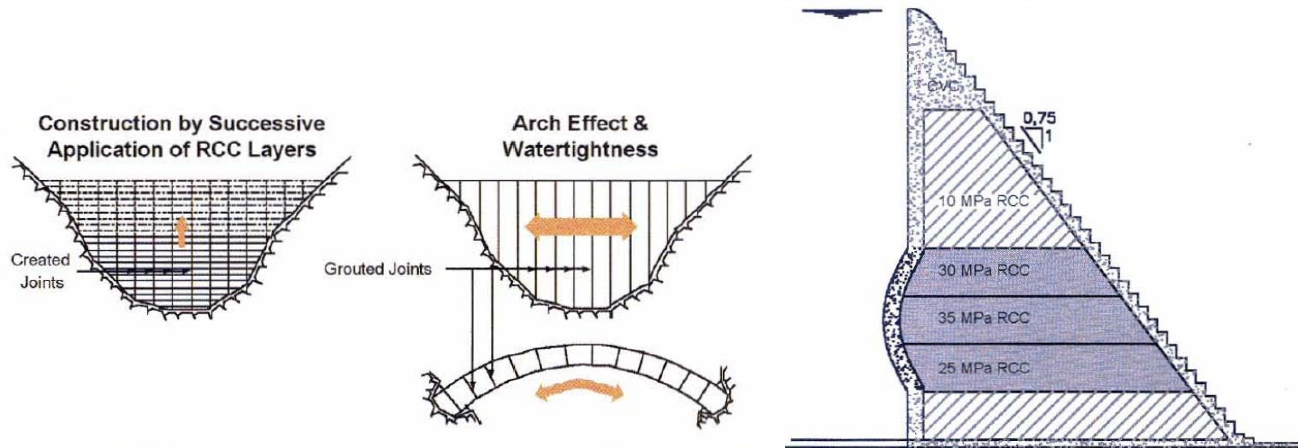


Figura 28 – Formação esquemática das juntas e propriedades do BCC (Stucky, 2006)

3

MODELO DE CÁLCULO DAS VARIACÕES DE TEMPERATURA

3.1. INTRODUÇÃO

As variações de temperatura, pelas suas características de permanência e de repetição, com os consequentes efeitos estruturais e de deterioração dos materiais, revela-se de entre as várias solicitações que ocorrem nas barragens de betão uma das mais relevantes. Por este motivo, impõe-se uma boa caracterização da evolução das temperaturas instaladas no corpo da barragem.

São vários os factores que influenciam o estado térmico de uma barragem. De entre esses factores salientam-se os factores climáticos, as propriedades térmicas dos materiais e o processo construtivo adoptado na obra, cujo conhecimento é fundamental para que se possa ajuizar do comportamento futuro da obra em fase de exploração.

A formulação geral das leis de transmissão de calor é já há muito conhecida, e amplamente divulgada em diversa bibliografia, constituindo, contudo, obra de referência aplicada a barragens, o livro “As variações de temperatura em barragens” de António F. da Silveira (LNEC, 1961). Realça-se que o desenvolvimento dos métodos numéricos, especialmente do método dos elementos finitos, e as facilidades existentes de cálculo computacional tornam hoje possível a abordagem completa de problemas complexos de transmissão de calor.

Neste capítulo apresenta-se, um modelo de cálculo simplificado das variações de temperatura em barragens abóbada de BCC, baseado no método adoptado no “Design Specifications of Concrete Arch Dams of the People’s Republic of China”, proposto por Zhu Bofang especialista chinês nesta área e Li Zhanmei (International workshop on Arch Dams, 1990) e adaptado em 2003 para o cálculo das variações de temperatura em barragens abóbada de BCC (Bofang, 2003). O principal motivo da sua adopção está associado a um dos objectivos do presente trabalho, correspondente à análise do comportamento de uma barragem abóbada em BCC construída na China.

3.2. TRANSMISSÃO DE CALOR

Para estudar ou prever o comportamento das barragens face às acções térmicas a que estão sujeitas é necessário conhecer o modo de transmissão do calor através da estrutura.

A transmissão de calor entre dois elementos, ou entre dois pontos de um elemento, verifica-se sempre que entre eles se estabelece uma diferença de temperaturas dando-se uma transferência de energia de um para o outro. Esta transmissão de calor faz-se sempre no sentido do elemento a mais elevada

temperatura para o de temperatura mais baixa e com conservação de energia, isto é, a quantidade de calor que o elemento mais "quente" cede é igual à quantidade que o elemento mais "frio" recebe.

As três formas de transmissão de calor em barragens são fundamentalmente por condução, convecção e por radiação sendo que, a primeira é a mais condicionante para o comportamento térmico da estrutura. A transmissão de calor em sólidos resolve-se a partir de uma equação diferencial, conhecida por equação de Fourier, tendo em conta as propriedades dos materiais, as condições iniciais de fronteira e a geração de calor.

3.2.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Para a determinação das variações de temperatura, ao resolver um problema de transmissão de calor, há necessidade de considerar quantitativamente várias características ou propriedade físicas dos materiais, embora quase sempre elas sejam dependentes de diversos factores, tais como a composição química, o estado físico, a pressão e a temperatura. Entres esta constantes físicas contam-se a massa específica, o calor específico, a condutibilidade térmica, a difusibilidade térmica e o coeficiente de dilatação térmica.

A condutibilidade térmica (k) representa a quantidade de calor que passa através da unidade de superfície de uma substância, por unidade de tempo, quando existe uma diferença de temperatura unitária entre essa superfície e outra igual afastada de uma distância unitária.

O calor específico (c) de um material é a quantidade de calor necessária para, sem mudança de estado, elevar de uma unidade a temperatura da unidade de massa da substância. Representa uma característica ligada ao armazenamento de energia e a quantidade de trabalho que acompanha um aumento de temperatura resultante da adição de calor.

Define-se capacidade calorífica de uma substância (C), como o produto do seu calor específico pela sua massa específica:

$$C = \rho c \quad (3.1)$$

A característica térmica de um material, a que Kelvin deu o nome de difusibilidade (h^2) e Maxwell de condutibilidade termométrica, define-se pela expressão:

$$h^2 = \frac{k}{\rho c} \quad (3.2)$$

Estas são as principais constantes térmicas que intervêm nos problemas de troca de calor (Teles, 1985).

3.2.2. CONDUÇÃO

A transmissão de calor por condução é um processo que se realiza por trocas de energia sem movimentos moleculares, entre corpos em contacto directo ou partes de um mesmo corpo a diferentes temperaturas.

Esta é a forma típica de transmissão de calor pelos sólidos e rege-se pela lei de Fourier que estabelece que o fluxo de calor Q , por unidade de área, na direcção normal a esta, e por unidade de tempo (t), é proporcional ao produto do gradiente de temperatura (T) pelo coeficiente de condutibilidade térmica (k), isto é:

$$\frac{dQ}{dt} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.3)$$

Analisando os fluxos da calor pelas fronteiras de um elemento infinitesimal de um corpo constituído por um material homogéneo e termicamente isotrópico, e considerando a geração interna de calor, tal que $\dot{Q}(x,y,z,t)$ é a quantidade de calor gerada se positiva ou cedida se negativa, por unidade tempo e por unidade de volume, as temperaturas T nos pontos do interior do corpo podem determinar-se através da equação de Fourier adaptada a estas condições (Teles,1985):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

3.2.3. CONVECÇÃO

A transmissão de calor por convecção é um fenómeno complexo, que se realiza através do deslocamento de massas de fluidos (líquidos ou gases), onde há propagação de calor através da diferença de densidade desse fluido submetido a um gradiente de temperatura. O seu estudo envolve as leis da mecânica dos fluidos, da transmissão de calor por condução e as leis de armazenamento de energia.

3.2.4. RADIAÇÃO

A transmissão de calor por radiação realiza-se sem contacto físico entre os corpos, sendo efectuada pela propagação de ondas electromagnéticas de comprimentos de onda na ordem de 0,75 a 400 μm . O corpo que emite a energia radiante pela sua superfície é chamado emissor e o que recebe, o receptor. Das ondas electromagnéticas, as que se transformam mais facilmente em calor, quando absorvidas pelo receptor, são as infravermelhas, também chamadas ondas de calor. Quando o calor radiante incide na superfície de um corpo, ele é parcialmente absorvido, parcialmente reflectido e parcialmente transmitido.

3.3. FACTORES CLIMÁTICOS

3.3.1. RADIAÇÃO SOLAR

O efeito da radiação solar nas superfícies expostas de uma barragem reflecte-se numa elevação da temperatura na estrutura. Como é conhecido, a maioria das barragens abóbada são sujeitas ao seu carregamento mais severo no Inverno, quer pelos níveis mais elevados da albufeira que se verificam geralmente nessa época, quer pelo arrefecimento que se verifica no corpo da barragem e que pode originar o aparecimento de campos de tracção com valores significativos. Então, o efeito da radiação

solar torna-se geralmente benéfico pois provoca um aumento da temperatura do corpo da barragem e consequentemente uma redução dos efeitos da variação de temperatura no dimensionamento. Em climas severos onde a barragem é orientada numa direcção vantajosa, o efeito da radiação solar em baixas condições de temperatura pode ser bastante significativo para reduzir as variações de temperatura a um nível aceitável.

A consideração do efeito da radiação solar em barragens é muitas vezes efectuado por um processo simplificado, através da introdução de ajustes nos parâmetros que definem as temperaturas dos paramentos submetidos a esse efeito. O procedimento simplificado adoptado neste estudo é referido no ponto seguinte.

3.3.2. TEMPERATURA DO AR

3.3.2.1. Descrição da formulação

Para a quantificação das condições de fronteira que condicionam o comportamento térmico das barragens de betão, a temperatura do ar é um factor climático de grande importância, seja na fase de construção ou na fase de exploração.

Num dado local a temperatura média diária do ar é geralmente bem aproximada por uma lei sinusoidal de período anual do tipo:

$$T_{ar} = T_{am} + A_a \cos\left(\frac{2\pi}{P}(\tau - \tau_0)\right) \quad (3.5)$$

onde:

T_{ar} – Temperatura do ar

T_{am} – Temperatura média anual

A_a – Semiamplitude de variação anual

τ – Data em que se calcular T_{ar} (Mêses)

τ_0 – Data em que se verifica a temperatura máxima (Mêses)

P – Período (12 Mêses)

Nos paramentos emersos da barragem, admite-se que a sua temperatura é igual à temperatura do ar. De modo simplificado o efeito da radiação solar pode ser considerado ajustando o valor de T_{am} e A_a .

Assim, a temperatura do paramento de jusante vem expressa por:

$$T_D = T_{DM} + A_D \cos\left(\frac{2\pi}{P}(\tau - \tau_0)\right) \quad (3.6)$$

com:

$$\left. \begin{aligned} T_{DM} &= T_{am} + \Delta T_s \\ A_D &= A_a + \Delta A_s \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

e onde:

T_{DM} – Temperatura média anual no paramento de jusante

ΔT_s – Incremento de temperatura devido à radiação solar

A_D – Semiamplitude da variação de temperatura anual do paramento de jusante

ΔA_s – Incremento da semiamplitude devido à radiação solar

3.3.2.2. Aplicação da formulação

Nesta secção apresenta-se os valores da temperatura imposta ao paramento de jusante da barragem.

A variação sinusoidal de temperatura imposta no paramento é dada pela expressão (3.8), e representada graficamente na Figura 29. A temperatura média anual do ar é de 14.7 °C e a semi-amplitude é de 9.08 °C. Para simular o efeito da radiação solar e de acordo com (Bofang, 2003), adoptou-se um incremento da temperatura média do ar de 3 °C.

$$T_D = (14.7 + 3) + 9.08 \cos\left(\frac{2\pi}{12}(\tau - 6.5)\right) \quad (3.8)$$

Nesta expressão a unidade de tempo é o mês. A data em que se verifica a temperatura máxima ($\tau=6,5$) corresponde a 15 de Junho.

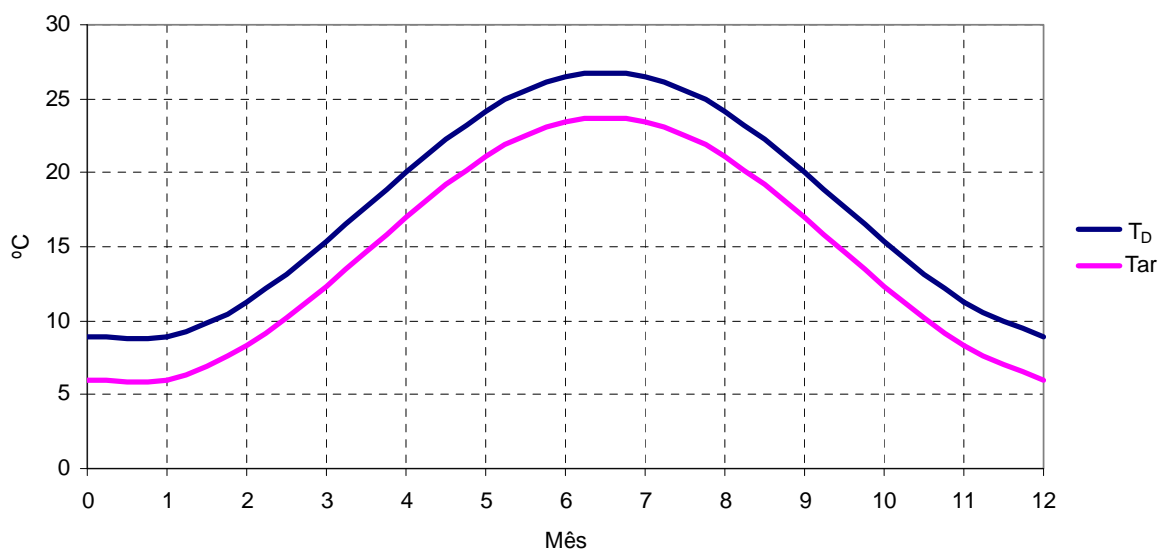


Figura 29 – Onda térmica actuando no paramento de jusante

3.3.3. TEMPERATURA DA ÁGUA

3.3.3.1. Descrição da formulação

Outro dos elementos fundamentais para a definição das condições fronteira no estudo térmico de barragens de betão é a temperatura da água na albufeira. Em todas albufeiras a temperatura da água varia com profundidade e com as estações do ano e é também influenciada por diversos factores tais como a temperatura do ar, a radiação solar, o regime hidrológico do rio e o tipo de exploração do aproveitamento. Essas variações podem ser estimadas com base em modelos matemáticos de previsão, em estudos preliminares ou mesmo, na experiência existente em outras obras em condições semelhantes. Em geral, é razoável assumir que a temperatura da água terá só uma variação anual, i.e., negligenciam-se as variações diárias.

A temperatura do paramento de montante admite-se igual à temperatura da água na albufeira e pode ser obtida através da formulação seguinte (Bofang, Z., Zhanmei, L., 1990):

$$T_U(y, \tau) = T_W(y, \tau) = T_{WM}(y) + A_W(y) \cos\left(\frac{2\pi}{P}(\tau - \tau_0 - \varepsilon)\right) \quad (3.9)$$

onde:

$T_U(y, \tau)$ – Temperatura no paramento de montante

$T_W(y, \tau)$ – Temperatura da água à profundidade y , para o mês τ

$T_{WM}(y)$ – Temperatura média anual da água à profundidade y

$A_W(y)$ – Semiamplitude da variação de temperatura anual da água à profundidade y

ε – Diferença de fase entre a variação de temperatura no paramento de montante e jusante

y – Profundidade do ponto em estudo

A temperatura média anual da água varia com a profundidade e obtém-se pela seguinte expressão:

$$T_{WM}(y) = c + (T_{surf} - c)e^{-0.04y} \quad (3.10)$$

na qual:

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{(T_{bot} - g \cdot T_{surf})}{1 - g} \\ g &= e^{-0.04H} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

onde:

T_{bot} – Temperatura média anual da água no fundo da albufeira

T_{surf} – Temperatura média anual da água à superfície da albufeira

H – Altura da albufeira (Profundidade máxima)

A semiamplitude da variação da temperatura da água pode escrever-se através da seguinte expressão:

$$A_w(y) = A_{w0} e^{-0.018y} \quad (3.12)$$

onde:

A_{w0} – Semiamplitude da variação de temperatura anual da água à superfície da albufeira

Os valores de A_{w0} e T_{surf} podem ser obtidos à luz das condições climáticas da localização da barragem, a partir da caracterização da temperatura do ar e dos efeitos da radiação.

A temperatura no fundo da albufeira é também dependente da altura da albufeira e do seu tipo de exploração, sendo usualmente estimada a partir de valores medidos em casos semelhantes.

A diferença de fase entre a variação de temperatura no paramento de montante e de jusante ou seja entre a temperatura da água em profundidade e a temperatura do ar, também varia com a profundidade e obtém-se através da seguinte expressão:

$$\varepsilon = 2.15 - 1.30e^{-0.085y} \text{ (mêses)} \quad (3.13)$$

3.3.3.2. Aplicação da formulação

Como base na formulação acima descrita, determinou-se a onda térmica que simula a temperatura da água na albufeira em profundidade e temporalmente, tal como mostra a expressão (3.14) e a Figura 30.

$$T_U(y, \tau) = 11.62 + 5.08e^{-0.04y} + 9.55e^{-0.018y} \cos\left(\frac{2\pi}{12}\left(\tau - 6.5 - (2.15 - 1.30e^{-0.085y})\right)\right) \quad (3.14)$$

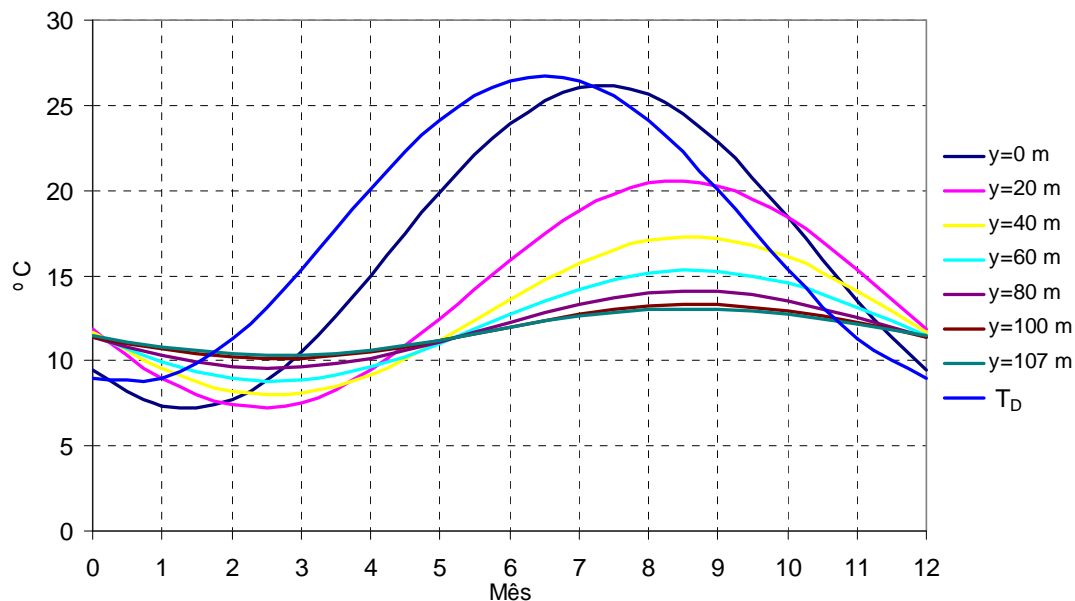


Figura 30 – Temperatura na albufera

3.4. ASPECTOS GERAIS DO ESTUDO TÉRMICO DE BARRAGENS

No estudo térmico de uma barragem distinguem-se, geralmente, as fases de construção da fase de exploração.

A construção de barragens em betão envolve grandes massas de volume desse material, razão pela qual é necessário particular cuidado na definição do faseamento construtivo, pois o calor de hidratação gerado em cada betonagem, bem como as diferenças térmicas entre fases subsequentes, podem conduzir a estados próximos da fissuração do betão. (Azenha et al, 2008)

Para o estudo térmico de uma barragem em fase construtiva torna-se necessário conhecer:

- As características térmicas do betão;
- A curva de geração de calor do ligante (cimento+cinzas);
- O programa de betonagens;
- Os parâmetros térmicos ambientais.

Geralmente uma das grandes dificuldades da realização de um estudo térmico deste tipo na fase de projecto de uma barragem está associado ao desconhecimento ainda existente àcerca destes dados.

O estudo térmico é geralmente conduzido a partir da integração da equação de Fourier (3.4) por via numérica, utilizando o método dos elementos finitos. No caso de uma barragem em construção tem de se associar a esta equação as condições de fronteira associadas à insolação, radiação, convecção e evaporação.

Outra dificuldade está associada à definição da evolução das propriedades mecânicas do betão a idades jovens, em função do tempo e da temperatura, com vista a proceder ao cálculo das tensões que se desenvolvem na fase construtiva.

No caso da construção tradicional de barragens abóbada é também importante a análise do seu arrefecimento artificial com vista a se obter a temperatura prevista no projecto, na época da injeção das suas juntas de contracção.

Os estudos térmicos de uma barragem em fase de exploração têm por finalidade determinar as distribuições de temperatura que a barragem experimentará durante o seu período de vida esperado. Nesta fase, admite-se a barragem solicitada a montante e a jusante pelas ondas térmicas representativas da temperatura da água da albufeira e do ar, respectivamente, sendo também de considerar o efeito da radiação solar (Figura 31). Nestas condições, o fluxo térmico é essencialmente na direcção montante jusante, pelo que a espessura da barragem se assume como o perímetro geométrico preponderante, admitindo-se um comportamento térmico em regime estacionário.

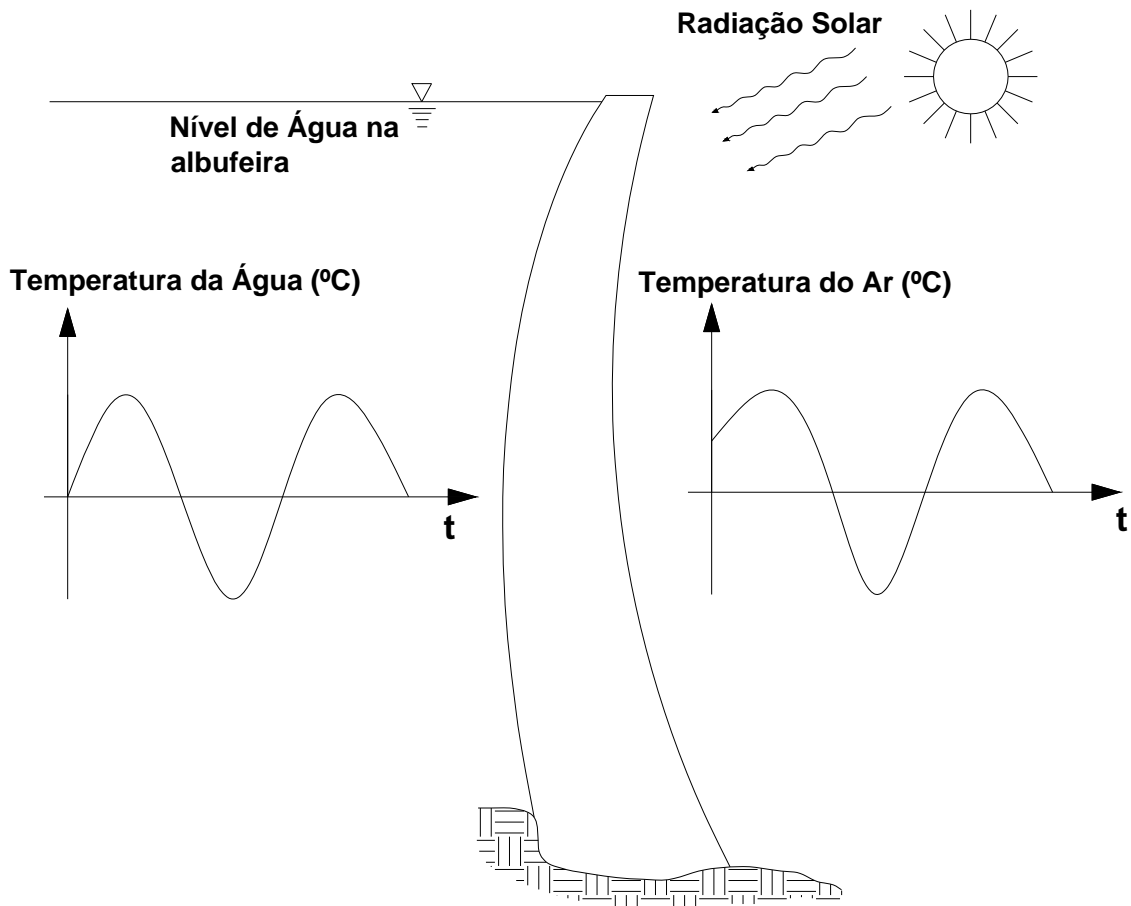


Figura 31 – Temperatura nas fronteiras

Conforme referido na introdução deste capítulo, no presente trabalho aborda-se apenas um método de cálculo simplificado das variações de temperatura em barragens abóbada de BCC em fase de exploração, e aplicado no projecto de barragens chinesas. (Bofang, 2003)

Contudo para ilustrar o comportamento da evolução térmica de uma barragem abóbada em BCC e em betão convencional em fase de construção, apresenta-se no ponto 3.6 o resumo de um artigo publicado sobre este tema.

3.5. CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EM BARRAGENS ABÓBADA DE BCC EM FASE DE EXPLORAÇÃO

Tal como já se referiu, as variações de temperatura são controladas pelas condições específicas do local, nomeadamente as temperaturas do ar, temperaturas da água na albufeira, da radiação solar, da temperatura na fundação, bem como pelas propriedades do betão. A partir do conhecimento das condições ambientais, é possível chegar à definição das ondas térmicas a aplicar aos paramentos da barragem tal como se ilustrou na Figura 31.

Nas barragens delgadas, a distribuição de temperatura à espessura tende a aproximar-se da forma linear. Contudo, para espessuras significativas a distribuição de temperaturas é tipicamente não linear, correspondente ao amortecimento e desfasamento associado à penetração das ondas térmicas na massa do betão, como se ilustra na Figura 32.

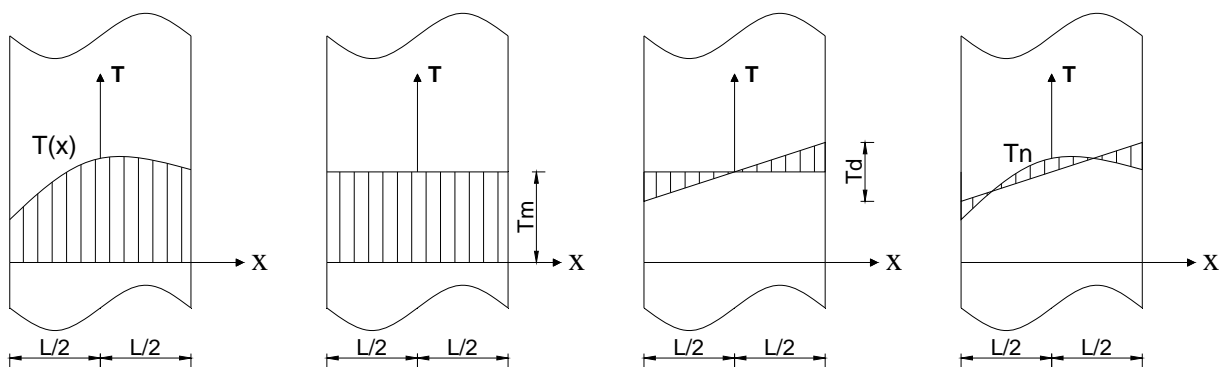


Figura 32 – Distribuição de temperatura na secção de uma barragem (Bofang, Z., Zhanmei, L., 1990)

Assim, a distribuição de temperatura na secção de uma barragem pode ser decomposta em três parcelas: a temperatura média T_m , um diferencial T_d relativo à temperatura linear equivalente e outro diferencial T_n relativo à temperatura não linear. Estas parcelas podem ser determinadas pelas seguintes expressões (Bofang, Z., Zhanmei, L., 1990):

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T(x) dx \quad (3.15)$$

$$T_d = \frac{12}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} T(x) x dx \quad (3.16)$$

$$T_n(x) = T(x) - T_m - T_d x / L \quad (3.17)$$

e onde L é a espessura da barragem na secção considerada.

Os valores de T_n são importantes para o controlo da temperatura superficial mas o seu efeito é irrelevante para os esforços e deslocamentos da barragem. Por este motivo, na análise de tensões devido às variações térmicas, habitualmente apenas se considera a temperatura média T_m e a diferença de temperatura linear equivalente T_d .

As tensões causadas nos paramentos pela diferença não linear de temperatura T_n , podem ser avaliadas à luz da teoria das secções planas através da seguinte expressão (Bofang, Z., Zhanmei, L., 1990).

$$\sigma = -\frac{E\alpha T_n}{1-\nu} \quad (3.18)$$

onde:

σ – Tensão Normal (facetas normais ao paramento)

E – Módulo de elasticidade

α – Coeficiente de dilatação térmica

ν – Coeficiente de Poisson

No âmbito deste trabalho, procedeu-se ao cálculo das variações de temperatura para duas situações distintas que se verificam em barragens chinesas em BCC, seguidamente apresentadas.

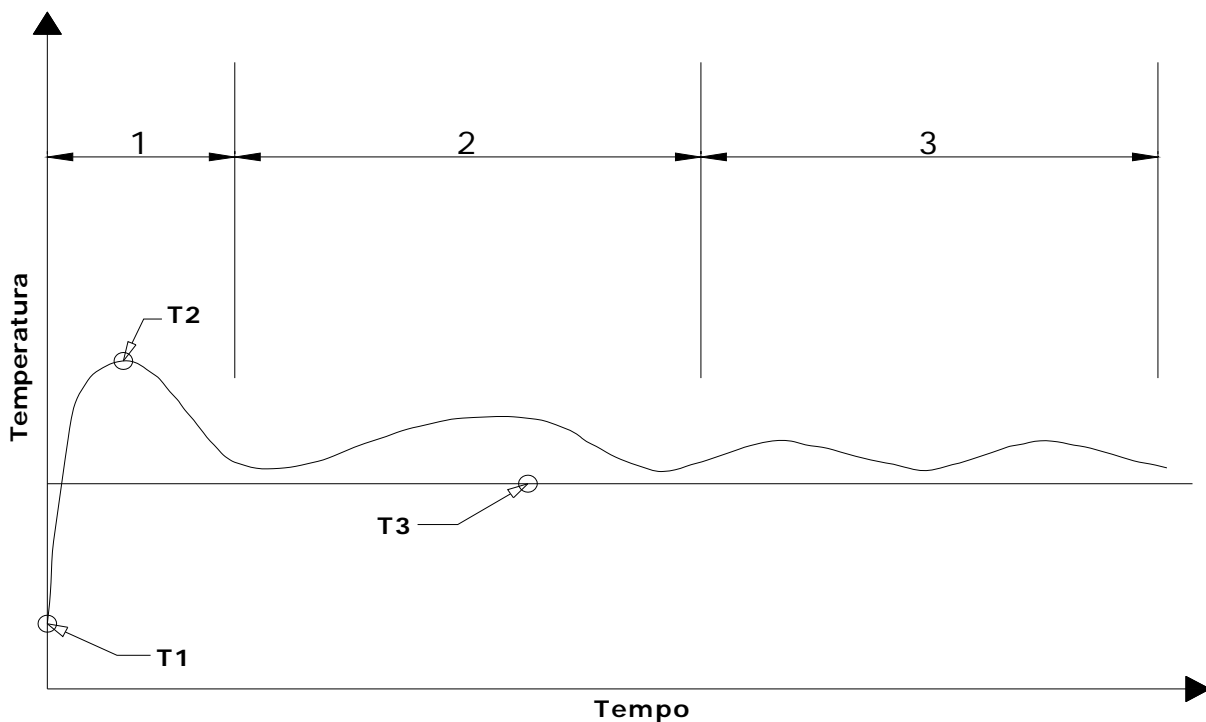
3.5.1. CASO 1 - CONSTRUÇÃO SEM JUNTAS DE CONTRACÇÃO E SEM ARREFECIMENTO ARTIFICIAL

No primeiro caso, Caso 1, considerou-se a construção de uma barragem abóbada sem juntas de contracção, ou apenas com juntas induzidas, e sem arrefecimento artificial.

A Figura 33 mostra, de forma qualitativa a evolução tipo da temperatura no núcleo da barragem para este caso.

A consideração deste caso justifica-se devido a existência de barragens abóbada em BCC sem juntas de contracção. Além disso, permite ter uma noção das tensões experimentadas pela barragem após a sua construção e, também, avaliar a necessidade de juntas transversais ou induzidas e definir o seu posicionamento mais conveniente.

Contudo refere-se que a barragem chinesa em estudo neste trabalho não está situada numa região fria e apresenta juntas de contracção, pelo que realização desta opção é meramente especulativa podendo os resultados obtidos serem susceptíveis de não representar a realidade.



- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Período inicial | T1 - Temperatura de colocação |
| 2 - Período de estabilização | T2 - Pico de temperatura |
| 3 - Ciclo de temperatura anual final | T3 - Temperatura natural de fecho |

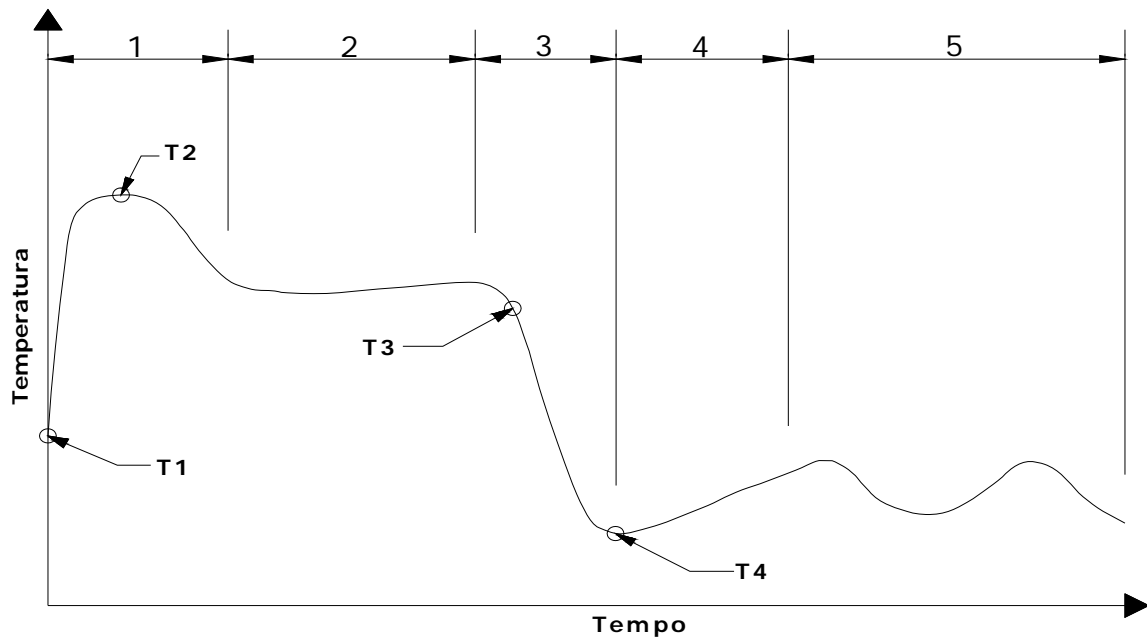
Figura 33 – Evolução da temperatura em barragens abóbada sem arrefecimento artificial (adaptado de Army Corps of Engineers, 1994)

3.5.2. CASO 2 - CONSTRUÇÃO COM JUNTAS DE CONTRACÇÃO E ARREFECIMENTO ARTIFICIAL

Na Figura 34 apresenta-se a história da evolução típica da temperatura no núcleo de uma barragem de betão artificialmente arrefecida, o que se consegue fazendo circular água refrigerada em serpentinas³ embebidas nas camadas de betonagem.

Esta técnica é aplicada em barragens abóbada de betão convencional para antecipar a estabilização térmica dos seus blocos e aplica-se também a barragens abóbada em BCC. O arrefecimento entre T3 e T4 provoca a franca abertura das juntas para facilitar as operações de injeção com calda de cimento. Nesta fase os blocos têm comportamento estrutural independente e devem ter condições de estabilidade adequadas para a acção do peso próprio. Só após a injeção das juntas é que se consegue a monolitização da estrutura ficando esta apta para suportar os efeitos da pressão hidrostática.

³ Nas barragens abóbada em BCC construídas na China, foram utilizadas serpentinas de polietileno em vez de serpentinas em tubo de ferro conforme tradicionalmente utilizado em barragens abóbada em betão convencional.



- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1 - Período inicial | T1 - Temperatura de colocação |
| 2 - Período sem arrefecimento | T2 - Pico de temperatura |
| 3 - Período de arrefecimento artificial final | T3 - Temperatura natural de fecho |
| 4 - Período de estabilização | T4 - Temperatura de injeção |
| 5 - Ciclo de temperatura anual final | |

Figura 34 – Evolução da temperatura em barragens abóbada com arrefecimento artificial (adaptado de Army Corps of Engineers, 1994)

3.5.3. CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

Neste trabalho tal como anteriormente referido, para o cálculo das variações térmicas utilizou-se uma formulação proposta pelo especialista chinês nesta área Zhu Bofang. Segundo este autor, as variações de temperatura em barragem abóbada para os dois casos em estudo neste trabalho podem ser obtidas através da expressão (3.19) alterando-se apenas o significado de T_{m0} como adiante se explica:

$$\left. \begin{aligned} T_m &= T_{m1} \pm T_{m2} - T_{m0} \\ T_d &= T_{d1} \pm T_{d2} - T_{d0} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

onde,

T_m e T_d são a temperatura média e diferença de temperatura para o diagrama linear à espessura que permitem calcular as temperaturas nos paramentos de montante e de jusante.

T_{m0} e T_{d0} representam no Caso 1 os valores máximos de T_m e T_d verificados no processo de construção enquanto que no Caso 2 representam a temperatura de injeção das juntas.

T_{m1} e T_{d1} são os valores assumidos por T_m e T_d devido à actuação da temperatura média anual nos paramentos

T_{m2} e T_{d2} são devidos ao efeito da variação no tempo das temperaturas nos paramentos.

3.5.3.1. Cálculo de T_{m0} e T_{d0}

▪ Caso 1

Neste capítulo aborda-se o cálculo das variáveis T_{m0} e T_{d0} envolvidas na expressão (3.19). Para o cálculo destes valores de forma rigorosa, e conforme já referido, deve efectuar-se uma análise térmica simulando a fase de construção, envolvendo entre outros, os parâmetros relativos ao ritmo de construção, temperatura de colocação do betão de cada camada, e as propriedades das misturas incluindo a sua evolução no tempo. Apesar de estas análises estarem actualmente facilitadas pelos métodos e modelos de cálculo disponíveis, considerou-se que a sua utilização envolveria uma complexidade que ultrapassava o âmbito deste trabalho e que não se justificava face aos objectivos definidos, recorrendo-se por isso, à formulação simplificada seguidamente resumida, apresentada por (Bofang, 2003).

A temperatura máxima alcançada no betão durante o processo de construção é determinada através da seguinte expressão:

$$T_m = T_p + K_r T_r \quad (3.20)$$

na qual, T_p corresponde à temperatura de colocação do betão, T_r representa o aumento máximo de temperatura devido à libertação do calor de hidratação do betão, k_r é um coeficiente de redução que considera o efeito da compressão devido à elevação da temperatura numa fase inicial, o que compensará uma parte da força de tracção induzida pela diminuição de temperatura no betão numa fase posterior. O valor de k_r é aproximadamente igual a 0.70~0.85, tendo-se assumido de forma conservativa, $kr = 1.0$ pelo que:

$$T_m = T_p + T_r \quad (3.21)$$

As elevações adiabáticas de temperatura no betão são obtidas a partir da seguinte expressão:

$$\theta(\tau) = \theta_0 (1 - e^{-m\tau}) \quad (3.22)$$

onde:

- τ representa a idade do betão em dias
- m é uma constante que tem em conta a taxa de calor de hidratação libertado
- θ_0 expressa a elevação de temperatura adiabática final

Numa barragem de BCC, considerando a perda de calor pelos paramentos de montante e de jusante bem como pela superfície superior da camada, a temperatura máxima ao longo da espessura devido ao calor de hidratação pode ser expressa por:

$$T_r = sN\theta_0 \quad (3.23)$$

onde:

- N é um coeficiente relacionado com a perda de calor pelos paramentos, cuja solução teórica está representada na Figura 35.

- s é o coeficiente relacionado com a perda de calor que depende essencialmente da taxa de elevação da barragem, e cujos valores obtidos por via numérica estão também representados na Figura 35.

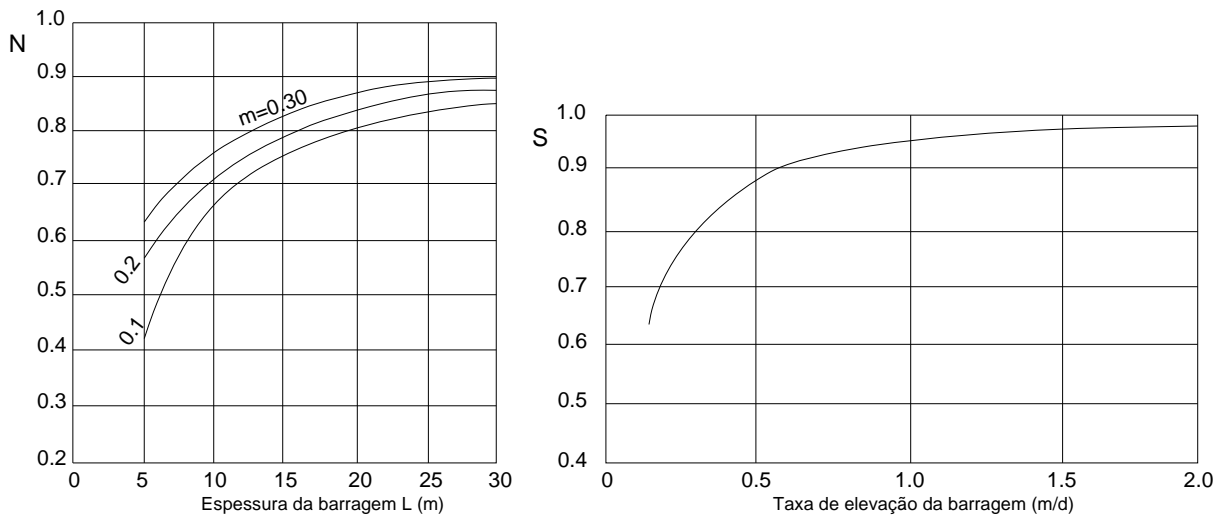


Figura 35 – Coeficiente N e s para perdas de calor pelos paramentos e superfície das camadas (Bofang, 2003)

Dado que nesta fase as condições fronteira a montante e jusante são idênticas e que se não for levada nenhuma medida especial, a distribuição de temperaturas à espessura da barragem é geralmente simétrica, assim a diferença de temperatura linear equivalente será nula:

$$T_{d0} = 0 \quad (3.24)$$

▪ Caso 2

Comparando este caso com o cálculo das variações de temperatura nas barragens sem juntas de contracção verifica-se que apenas varia o significado de T_{m0} e de T_{d0} , que passam agora a representar respectivamente, a temperatura média e o diferencial para a temperatura linear equivalente da temperatura de injeção das juntas de contracção.

Antes da injeção das juntas, tal como ilustrou na Figura 34, a barragem é artificialmente arrefecida com auxílio de tubos de polietileno, nos quais se faz circular a água a baixa temperatura de forma a atingir a temperatura de injeção assim:

$$\left. \begin{array}{l} T_{m0} = T_{m1} - \Delta C \\ T_{d0} = 0 \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

onde, ΔC representa a variação de temperatura devido ao efeito do arrefecimento introduzido na barragem.

Para a análise em estudo, optou-se por considerar duas temperaturas distintas de injeção, sendo uma considerada igual à temperatura média anual da barragem no período de exploração, e a outra correspondente a um arrefecimento da barragem de 5°C. Nas expressões (3.26) e (3.27) resume-se as temperaturas de injeção para os dois casos. Esta comparação permitirá observar a influência da temperatura de injeção no comportamento estrutural da barragem. No primeiro caso, adoptou-se uma temperatura mediana, estando por isso a barragem ainda sujeita a variações sazonais de aumento e descida de temperatura. No segundo caso com o arrefecimento da barragem, esta estará sujeita a menores variações de temperatura nos meses de Inverno, e sofrerá essencialmente subidas de temperatura que tendem a induzir-lhe um campo de tensões de compressão.

$$\left. \begin{array}{l} T_{m0} = T_{m1} \\ T_{d0} = 0 \end{array} \right\} \text{Caso 2-A)} \quad (3.26)$$

$$\left. \begin{array}{l} T_{m0} = T_{m1} - 5^\circ C \\ T_{d0} = 0 \end{array} \right\} \text{Caso 2-B)} \quad (3.27)$$

As tabelas resumo deste cálculo, aplicado à barragem em estudo, encontram-se no anexo A1.

3.5.3.2. Cálculo de T_{m1} e T_{d1}

Dado que as barragens abóbada não são geralmente muito espessas, a distribuição da temperatura média anual ao longo da espessura é praticamente linear. Assim a temperatura média T_{m1} e diferença de temperatura linear equivalente T_{d1} , relativo a temperatura média anual no período de operação podem ser obtidas como se segue:

$$\left. \begin{array}{l} T_{m1} = \frac{1}{2}(T_{DM} + T_{WM}) \\ T_{d1} = (T_{DM} - T_{WM}) \end{array} \right\} \quad (3.28)$$

3.5.3.3. Cálculo de T_{m2} e T_{d2}

A temperatura média T_{m2} , resultante da variação anual de temperatura da água no paramento de montante e do ar no paramento de jusante, pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$T_{m2} = k_m \left[A_D \cos(\omega(\tau - \tau_0 - \theta_m)) + A_W(y) \cos(\omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon - \theta_m)) \right] \quad (3.29)$$

na qual:

$$k_m = \frac{1}{2\eta} \sqrt{\frac{2(\cosh(\eta) - \cos(\eta))}{\cosh(\eta) + \cos(\eta)}} \quad (3.30)$$

$$\theta_m = \frac{1}{\omega} \left[\frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\eta)}{\text{senh}(\eta)} \right) \right] \quad (3.31)$$

e onde:

$$\omega = \frac{2\pi}{P} ; P = 12 \text{ meses} \quad (3.32)$$

$$\eta = L \sqrt{\frac{\pi}{aP}} ; a - \text{Difusibilidade térmica do betão} \quad (3.33)$$

De igual modo, o diferencial da temperatura linear equivalente T_{d2} , resultante da variação anual de temperatura da água no paramento de montante e do ar no paramento de jusante, pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$T_{d2} = k_d \left[A_D \cos(\omega(\tau - \tau_0 - \theta_d)) - A_W(y) \cos(\omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon - \theta_d)) \right] \quad (3.34)$$

na qual:

$$K_d = \sqrt{a_1^2 + b_2^2} \quad (3.35)$$

$$\theta_d = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad (3.36)$$

e onde:

$$a_1 = \frac{6 \operatorname{sen}(\omega \theta_m)}{k_m \eta^2} \quad (3.37)$$

$$b_1 = \frac{6}{\eta^2} \left(\frac{1}{k_m} \cos(\omega \theta_m) - 1 \right) \quad (3.38)$$

A tabela resumo deste cálculo, aplicado a barragem em estudo e descrita no Capítulo 4, encontra-se no anexo A1.

3.6. EXEMPLO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA CONSTRUÍDA EM BCC E EM BETÃO CONVENCIONAL

O problema chave no dimensionamento de barragens abóbada em BCC reside na análise das tensões térmicas e nas medidas de controlo de temperatura tomadas com base nesse cálculo para evitar a fissuração da barragem.

Por este motivo, têm-se efectuado estudos com o objectivo de simular e analisar a distribuição das temperaturas e das tensões no corpo da barragem, permitindo aos projectistas preverem a adopção de medidas para evitar o aparecimento ou perceber as causas de possíveis fissurações, bem como definir qual a mistura de betão mais adequada e se o plano de betonagem é apropriado.

Neste âmbito torna-se interessante divulgar as conclusões de um artigo publicado por Nima Nilipour e Alexandre Wohnlich em (Berga; International Commission on Large Dams. Spanish Committee on Large Dams., 2006) no qual se compara a evolução do estado térmico de uma barragem abóbada suíça com 126 m de altura (a barragem de Sarraire), para a qual se simulou a construção em BCC e o processo de construção tradicional em betão convencional vibrado (BV), por blocos. Para os dois casos efectuou-se uma análise térmica transiente, seguida de uma análise termo-mecânica dependente do tempo e considerando um comportamento não linear para o betão.

Para o BCC admitiu-se uma dosagem 180 kg/m³ de ligante (50% de cinzas), e uma quantidade total de geração de calor de 309 J/gr após 200 dias para o cimento e 40% deste valor para as cinzas. Para o BV considerou-se uma dosagem de ligante de 200 kg/m³, composto em 70% por cimento com baixo calor de hidratação e 30% de cinzas, com uma libertação total de calor aos 28 dias de 270 J/gr.

Nas Figura 36 e Figura 37 é possível observar a história das temperaturas e os máximos atingidos em ambos os modelos. Como se pode observar pelas figuras, a temperatura nos nós situados no paramento de montante (X=0), descrevem uma sinusóide representativa da temperatura ambiente, e que nos pontos progressivamente mais interiores verifica-se uma diminuição das amplitudes das variações de temperatura e um maior desfasamento. Acrescenta-se que dado a secção ser espessa não se repercutem consideravelmente nos nós centrais as variações sazonais de temperatura; igualmente se observa que a descida de temperatura após ter atingido o pico apresenta um declive quase constante até estabilizar sensivelmente a temperatura média anual.

No modelo de BCC a temperatura máxima atingida foi de 29.5°C e ocorreu 132 dias depois da colocação do betão, enquanto no modelo com BV verifica-se que a temperatura máxima ocorreu 25 dias após a betonagem e atingiu os 42.5 °C.

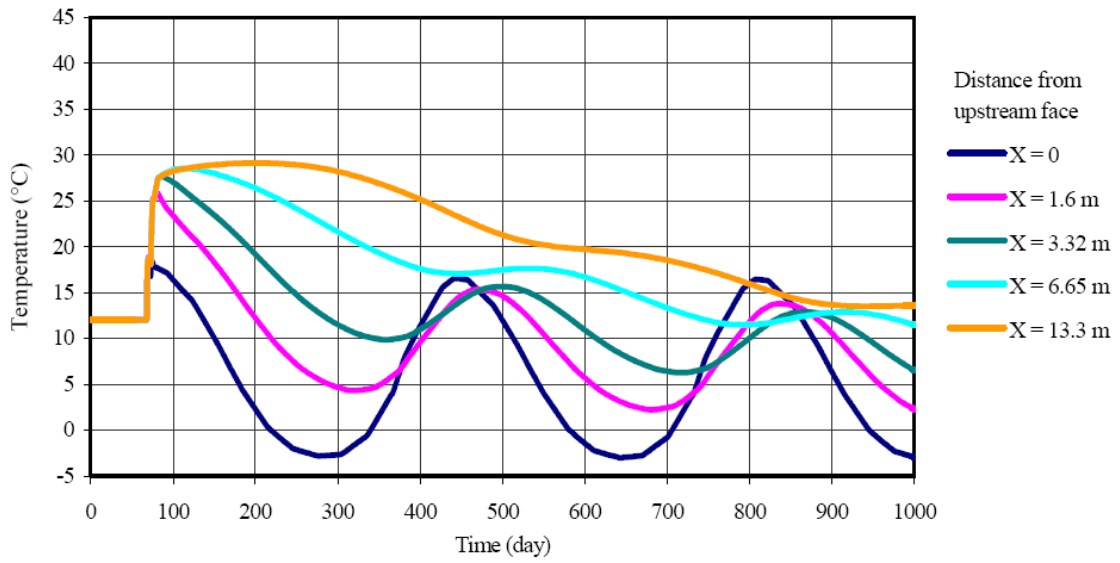


Figura 36 – Variações de temperatura em função do tempo no modelo de BCC (Nilipour, N., Wöhrlich, A., 2006)

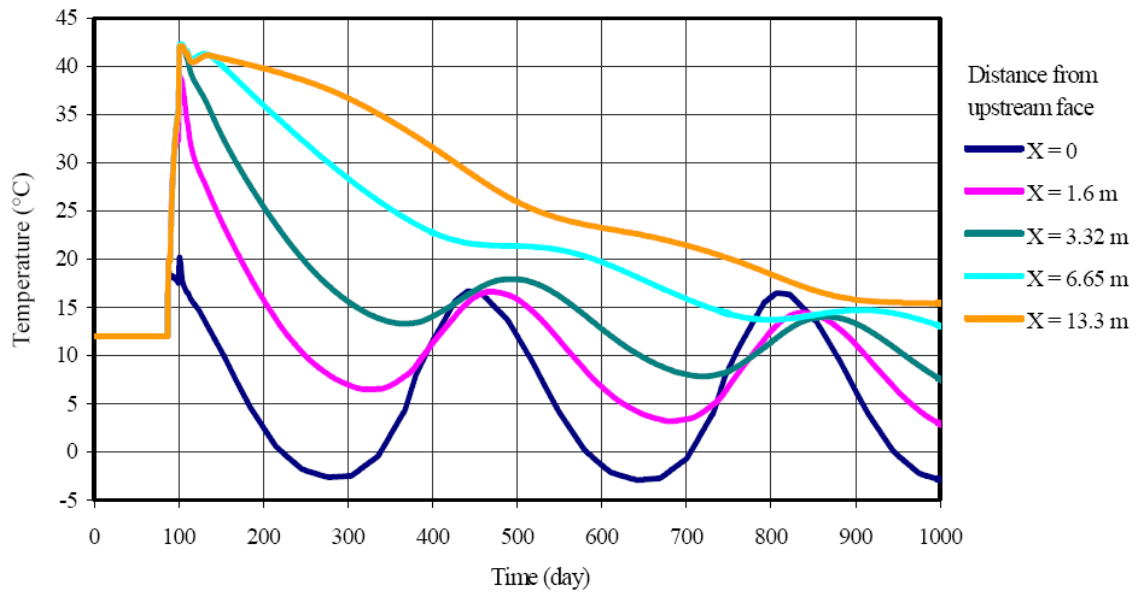


Figura 37 – Variações de temperatura em função do tempo no modelo em BV (Nilipour, N., Wöhrlich, A., 2006)

Analisando a distribuição de temperatura à espessura, verifica-se, como se observa da Figura 38, que apesar de as temperaturas serem mais elevadas no modelo em betão convencional, os gradientes térmicos dos dois modelos são sensivelmente iguais, diferindo apenas à superfície onde o modelo de BCC apresenta valores reduzidos comparativamente ao outro modelo.

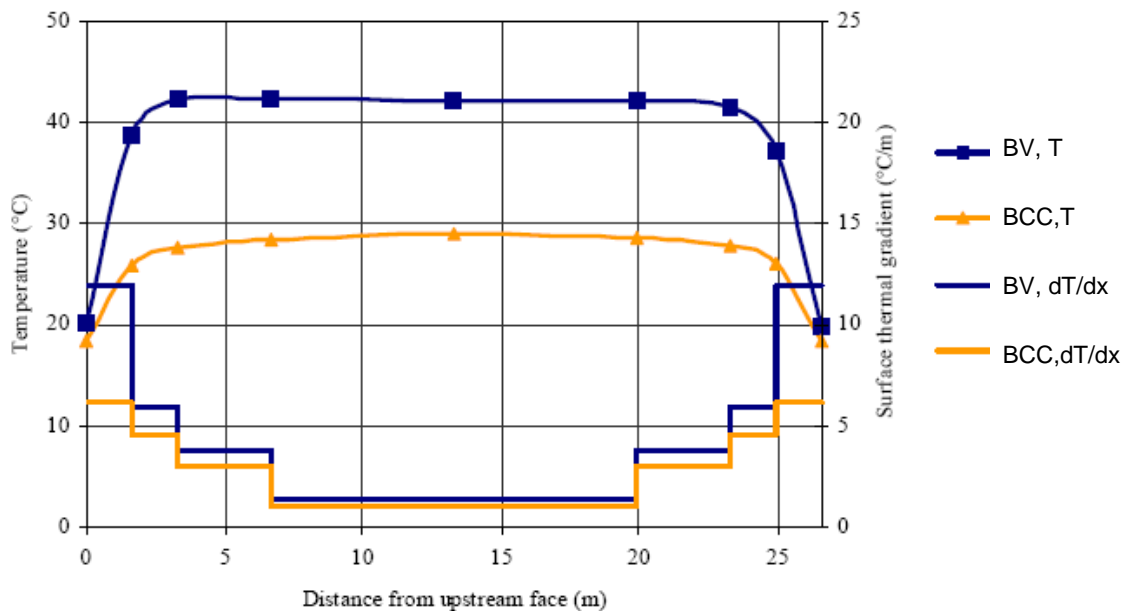


Figura 38 – Comparação das temperaturas e gradientes térmicos (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)

Da análise das Figura 39 e Figura 40, constata-se que as máximas tensões de tracção que ocorrem no modelo em betão convencional (850 kN/m^2) são maiores do que as verificadas no modelo em BCC (550 kN/m^2). Verifica-se que enquanto as tensões máximas ocorrem nos primeiros dias devido ao pico de temperatura existente no modelo de construção convencional, no modelo em BCC as tensões máximas verificam-se em fase de exploração (neste estudo apenas se considerou a variação térmica anual) depois de ter ultrapassado o pico de temperatura. Ou seja, na barragem de BCC o efeito da temperatura no período de operação parece mais importante do que as tensões provocadas em fase construtiva, pelo que o pós arrefecimento do BCC parece não ser imprescindível.

Porém refere-se que as tensões são muito sensíveis aos valores tomados pelo coeficiente de dilatação térmica e do módulo de elasticidade, os quais são fortemente influenciados pelo tipo de agregados empregue na mistura do betão. Assim realça-se a importância da necessidade de, para cada projecto, se proceder a testes em laboratório para se adoptar valores razoáveis com base nas condições locais. Deve-se procurar uma mistura com baixo coeficiente de dilatação térmica e módulo de elasticidade mas com adequada resistência à tracção.

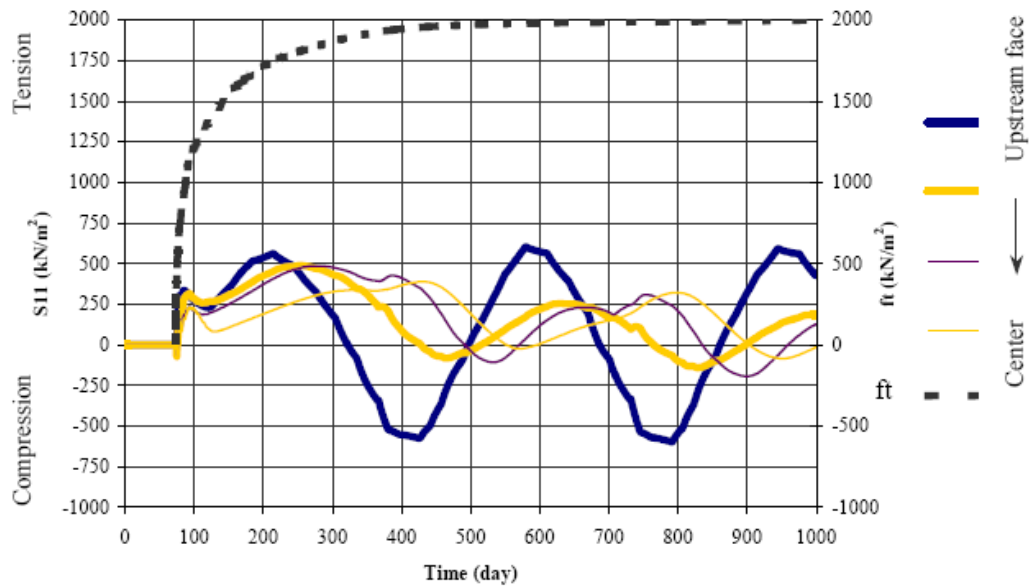


Figura 39 – Tensões principais máximas no modelo de BCC (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)

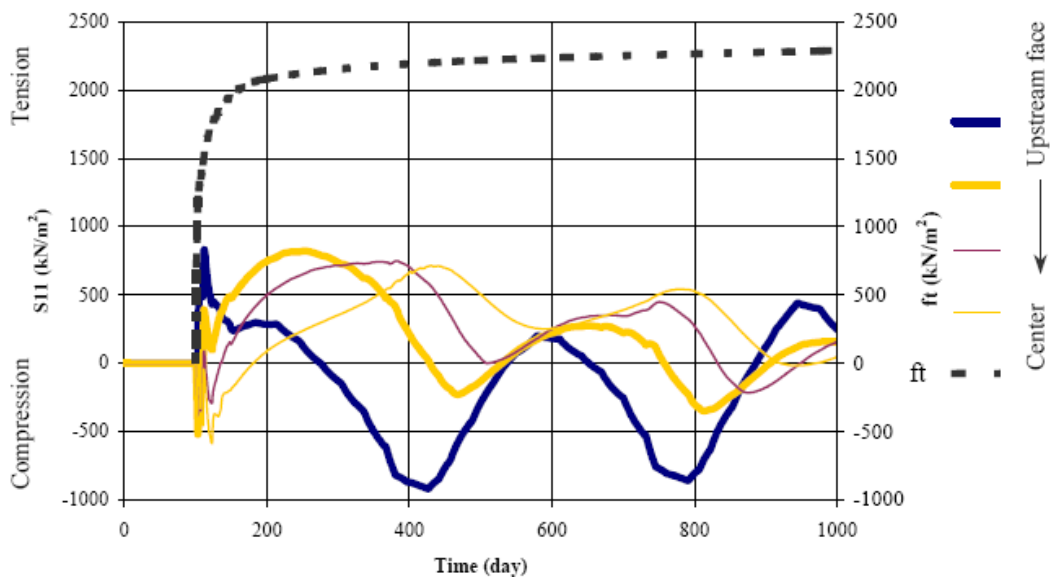


Figura 40 – Tensões principais máximas no modelo em BV (Nilipour, N., Wohnlich, A., 2006)

Resumidamente, este estudo evidencia que nas barragens abóbada em BCC a elevação da temperatura e os gradientes térmicos são menos elevados, o que induz tracções de menor valor no corpo da barragem e evita o aparecimento de fissuras. A causa responsável por estes resultados reside principalmente nas propriedades térmicas do BCC, por utilizar menor quantidade de cimento o que reduz a quantidade de calor de hidratação. O estudo mostra ainda que existe uma nítida diminuição do valor de pico da temperatura que nestes ocorre mais tarde comparativamente as barragens tradicionais, derivado dos diferentes cimentos utilizados e das respectivas curvas do calor de hidratação. Dado que nas barragens convencionais o pico de temperatura se manifesta mais cedo, o aparecimento das

tensões máximas de tracção ocorrem numa idade jovem do betão podendo este ainda não apresentar a sua resistência máxima, o que aumenta o risco de ocorrência de fissuração. Contrariamente, nas barragens de BCC o pico de temperatura é menos elevado e ocorre mais tarde, o que representa uma situação mais favorável.

Assim, nesta simulação, a barragem em BCC evidenciou um melhor comportamento térmico e a vantagem de se poder reduzir o número de juntas. Contudo a opção entre uma barragem abóbada em BCC ou em BV dependerá essencialmente do custo de construção e de outras características tais como a permeabilidade e durabilidade.

4

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARRAGEM ABÓBADA EM FASE DE EXPLORAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o estudo efectuado para uma barragem abóbada em BCC, tendo como objectivo a análise do comportamento da obra durante o período de exploração após o enchimento da albufeira. Para atingir este objectivo no âmbito desta dissertação, aplicou-se a formulação descrita no Capítulo 3, à barragem chinesa de Zhaolaihe apresentada na Figura 41. Esta foi escolhida para este estudo, devido às suas características geométricas serem muito próximas das barragens abóbada convencionais de betão e pela informação disponível acerca desta obra, no que respeita à geometria e a resultados de análises estruturais. Apesar de estar dotada de duas juntas transversais, espaçadas de 45 m, e por três indutores de fissuração, esta barragem foi construída no curto espaço de tempo de 14 meses, tendo-se atingido um ritmo máximo de elevação da barragem de 16 m por mês.



Figura 41 – Barragem de Zhaolaihe (<http://www.cwb11.com/jushudanwei/hasgj.html>)

4.2. GEOMETRIA

A barragem de Zhaolaihe, construída no rio Zhaolaihe na China, é do tipo abóbada de dupla curvatura como se pode ver pelo alçado e corte transversal apresentados na Figura 42. A barragem tem cerca de 107 m de altura e 198.05 m de desenvolvimento no coroamento que é bastante assimétrico conforme se pode ver pela sua definição geométrica em planta na Figura 43. A corda do arco de coroamento tem um comprimento total de 178 m, sendo apenas 68.50 m do lado da margem esquerda. A consola de fecho tem uma espessura de 6.0 m no coroamento e de 18,5 m na base, a que corresponde uma relação espessura /altura de 0.18. A espessura máxima verifica-se na nascença do arco situado 11,5 m acima da cota da fundação no fundo do vale e é de 22,7 m.

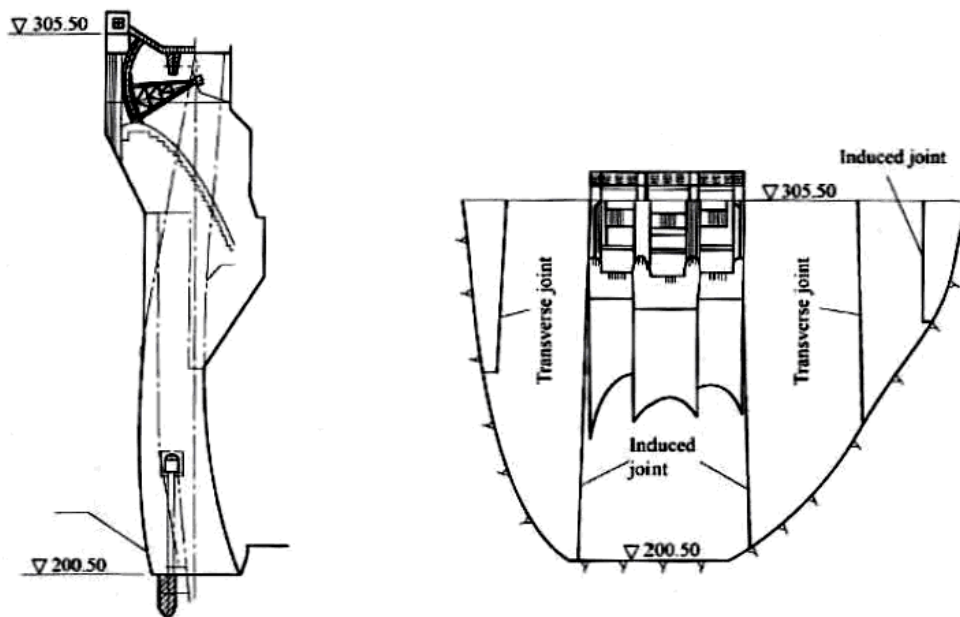


Figura 42 – Secção transversal e alçado da barragem de Zhaolaihe (Shengpei, 2007)

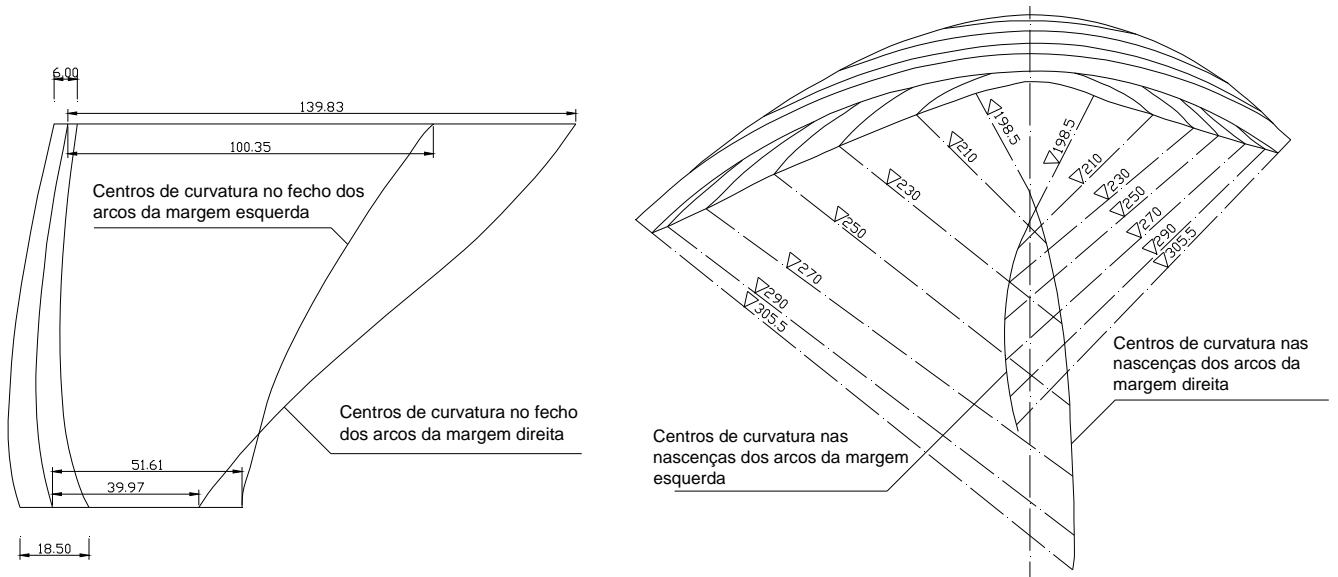


Figura 43 – Vista em planta e secção transversal (adaptado de (Li, 2007))

A definição da malha de elementos finitos necessária para a análise estrutural requer a definição das coordenadas cartesianas de pontos nos paramentos da abóbada que depende da definição geométrica dos seus arcos. A cada nível e para cada margem a directriz dos arcos é definida através de uma espiral logarítmica cuja equação polar é dada em (4.1). Com base na definição da directriz e da espessura dos arcos é possível determinar as coordenadas paramétricas rectangulares de pontos do paramento da abóbada como se apresenta no seguimento e na expressão (4.7), segundo (Li, 2007).

$$\rho = \rho_0 e^{k\varphi} \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} x_c &= \rho_0 \left[e^{k\varphi} \operatorname{sen}(\varphi + \theta) - \operatorname{sen}(\theta) \right] \\ y_c &= Y_c + \rho_0 \left[\cos(\theta) - e^{k\varphi} \cos(\varphi + \theta) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

onde:

$$k = \operatorname{tg}(\theta) \quad (4.3)$$

$$\rho_0 = \frac{R_0}{\sqrt{1+k^2}} \quad (4.4)$$

θ – Ângulo inicial da espiral logarítmica

ρ_0 – Raio polar inicial

φ – Ângulo central do arco

R_0 – Raio de curvatura ao eixo

Y_c – Coordenada em y do eixo de arco

A espessura também varia ao longo do desenvolvimento do arco e pode ser calculada como se segue:

$$T = T_c + (T_A - T_c) \left(\frac{S_c}{S_A} \right)^\alpha \quad (4.5)$$

na qual:

$$S_c = \frac{R_0}{k} (e^{k\varphi} - 1) \quad (4.6)$$

e onde:

T – Espessura do arco em qualquer ponto

T_A – Espessura do arco no encontro

T_C – Espessura do arco ao eixo central

S_C – Comprimento do arco entre o eixo e o ponto desejado

S_A – Comprimento do arco entre o eixo e o encontro

α – Índice de variação da espessura do arco no encontro, varia de 2.0 a 4.0, neste caso tomou-se 4.0

Assim, conciliando as equações (4.2) e (4.5), é possível escrever as equações das coordenadas paramétricas dos arcos horizontais que definem as curvas dos paramentos de montante e de jusante:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_c \pm \frac{T}{2} \operatorname{sen}(\varphi) \\ y &= y_c \pm \frac{T}{2} \cos(\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Para reproduzir a geometria da barragem, a partir dos parâmetros disponíveis na Tabela 4, procedeu-se ao cálculo das coordenadas paramétricas dos sete arcos conhecidos e, efectuou-se uma interpolação linear entre os vários níveis.

Tabela 4 – Parâmetros da barragem de Zhaolaihe (Li, 2007)

Elevação (m)	T_C (m)	T_L (m)	T_R (m)	$R_{0,L}$ (m)	$R_{0,R}$ (m)	θ_L (°)	θ_R (°)	φ_L (°)	φ_R (°)
198.5	18.5	19	19	51.613	39.971	17.27	23.98	25.94	23.92
210	16.831	21.07	22.701	56.733	50.736	6.08	6.71	43.423	40.5
230	14.181	17.89	21.597	64.687	72.06	19.57	7.17	48.48	46.24
250	12.07	14.36	13.766	72.421	94.154	17.61	11.28	47.918	46.994
270	10	10.8	10.9	80.89	114.535	8.98	8.89	46.76	48.71
290	7.5	7.572	7.51	90.903	131.047	2.47	3.27	44.539	47.624
305.5	6	6	6	100.349	139.831	4.47	1.22	42.85	46.37

Nota: Os Parâmetros com índice L e R, representam a característica em causa do lado da margem esquerda (L) e direita (R)

4.3. ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

Para esta análise, utilizou-se o programa ANSYS[®], que disponibiliza a utilização de diferentes tipos de elementos finitos. Para modelar a barragem utilizaram-se dois tipos de elementos tridimensionais: um elemento isoparamétrico de 20 nós para discretizar o corpo da barragem assim como o maciço de fundação durante a análise térmica, e outro tipo de elemento isoparamétrico de 20 nós para efectuar a análise estrutural. Esta discretização é muito vantajosa do ponto de vista da geração automática da malha, pois a forma dos elementos de 20 nós com seis faces pode degenerar em formas tetraédricas ou prismáticas permitindo assim um melhor refinamento da malha. A Figura 44 ilustra a geometria dos elementos utilizados, incluindo a localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento.

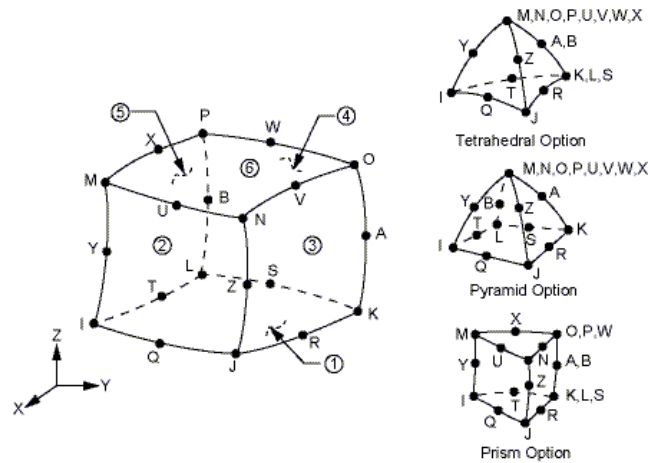


Figura 44 – Elemento de 20 nós (ANSYS, 2007)

Os elementos de 20 nós utilizados para a análise térmica e estrutural são designados no catálogo do programa por SOLID90 e por SOLID186, respectivamente. Este par de elementos foi o escolhido, pela característica de o elemento térmico SOLID90 ser substituído automaticamente após a análise térmica por um elemento estrutural compatível neste caso o SOLID186, permitindo facilmente a utilização dos resultados obtidos na análise térmica.

Os elementos SOLID90 possuem apenas um único grau de liberdade em cada nó, a temperatura, e são adequados para análises térmicas em estado estacionário ou transiente. A análise térmica efectuada neste estudo foi uma análise em estado estacionário, para obter a distribuição das temperaturas no corpo da barragem, sendo neste tipo de análise ignorados o calor específico e densidade do material.

Os elementos SOLID186 possuem três graus de liberdade por nó correspondentes aos deslocamentos nas direcções x , y e z . Estes elementos permitem a aplicação da pressão hidrostática em nós ou em qualquer face dos elementos, considerando-se positiva quando esta está a actuar contra o elemento. A temperatura pode ser aplicada em nós ou retirada dos resultados da análise térmica. A direcção das tensões no elemento está associada ao sistema de coordenadas do mesmo, como indica a Figura 45.

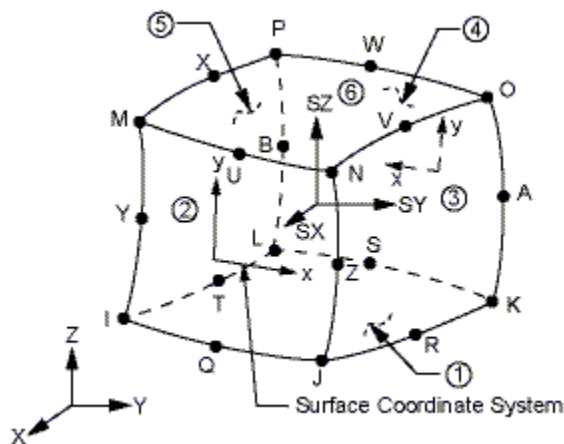


Figura 45 – Direcção das tensões (S_x , S_y e S_z) no elemento SOLID186 (ANSYS, 2007)

4.4. MODELO E GERAÇÃO DA MALHA

A primeira etapa a realizar na análise de uma estrutura mediante elementos finitos consiste na modelização da sua geometria pela associação de um ou mais tipos de elementos cujas funções de forma devem reproduzir o mais fielmente possível tanto a geometria como os deslocamentos reais.

No estudo de uma barragem abóbada, a discretização deve compreender não só a estrutura da barragem, como também o maciço de fundação.

Para a análise estrutural da barragem de Zhaolaihe, efectuaram-se duas discretizações distintas, com o intuito de avaliar a importância da deformabilidade do maciço de fundação. Assim, no primeiro modelo considerou-se a barragem rigidamente ligada ao maciço de fundação, enquanto no segundo incluiu-se no modelo o maciço de fundação com dimensões tais que as tensões introduzidas nos elementos mais afastados da fundação pudessem ser consideradas desprezáveis. Assim neste último caso, considerou-se a fundação impedida de deslocamentos nos seus contornos laterais e inferior.

Para realizar a malha de elementos finitos da barragem abóbada em estudo, procedeu-se inicialmente à definição dos volumes que definem a barragem e o maciço de fundação, conforme se evidencia na Figura 46.

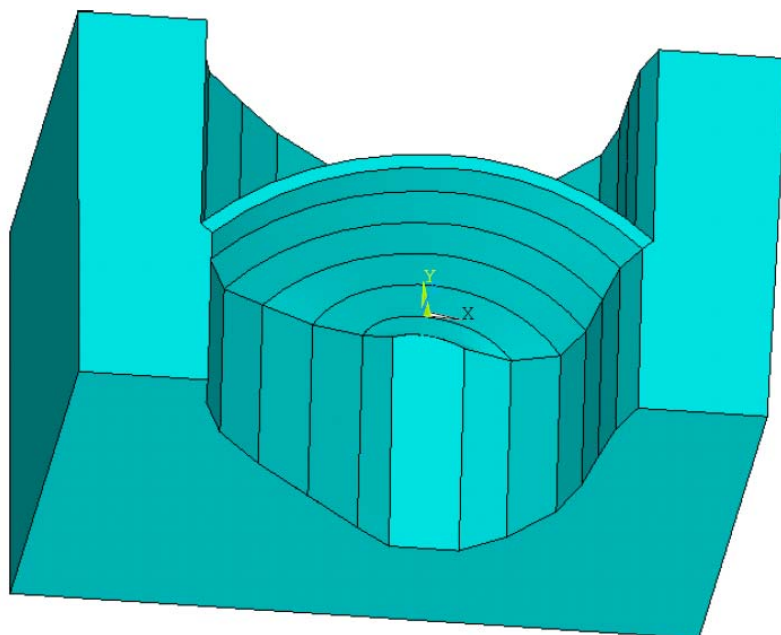


Figura 46 – Modelo definido por volumes

Seguidamente procurou-se obter uma malha de elementos finitos, que estivesse bem definida segundo os planos verticais e horizontais, de modo equivalente aos arcos e consolas no método Trial Load. No entanto tendo em consideração as limitações apresentadas pelo programa para a geração da malha de elementos finitos de volume hexaédricos, dividiu-se a estrutura com planos horizontais e verticais de modo a chegar a uma malha de elementos finitos satisfatória.

O modelo de elementos finitos apresentado na Figura 47 é composto unicamente por elementos de 20 nós hexaédricos. Este modelo apresenta características interessantes no que respeita o maciço de fundação pois, este está dividido em vários estratos permitindo desta forma se necessário uma

adequada caracterização das propriedades das diversas camadas. Quanto à discretização do corpo da barragem, salienta-se que foram adoptados três elementos ao longo da sua espessura. No entanto, devido ao elevado número de elementos que o modelo contém - 147120 nós para caracterizar o modelo completo, dos quais 10801 caracterizam a barragem e 137140 o maciço de fundação - foi necessário alterar o modelo de modo a diminuir a quantidade de memória requerida para efectuar o cálculo.

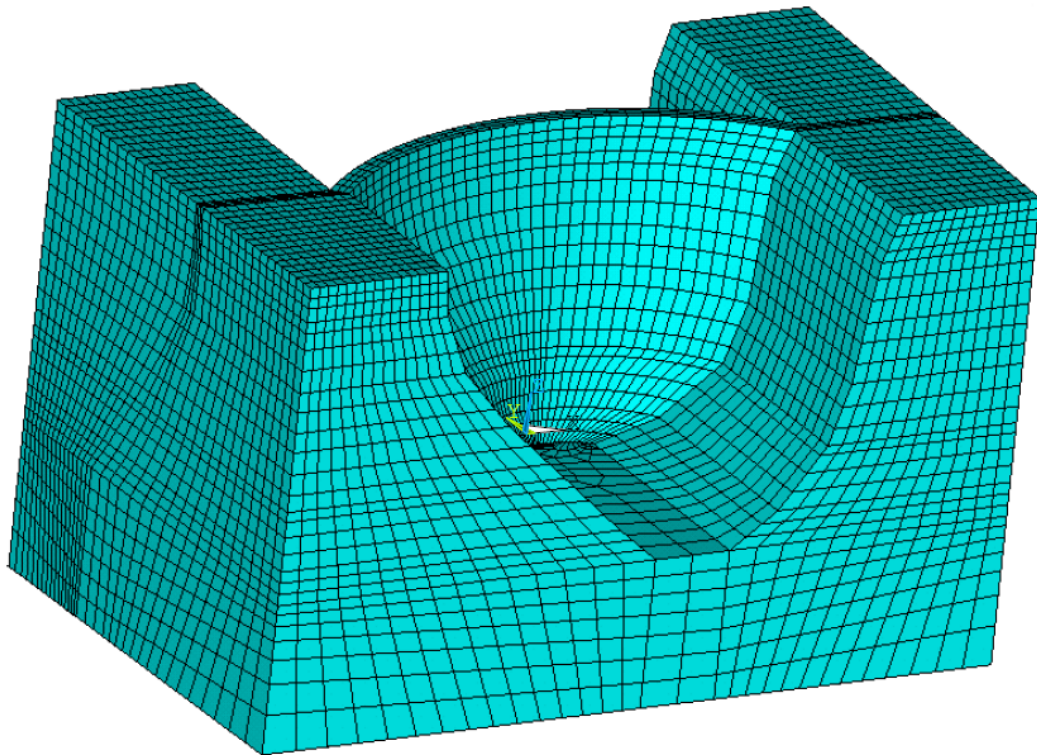


Figura 47 – Malha de elemento finitos hexaédricos

Com intuito de diminuir o número de elementos do modelo, e sendo o objectivo principal a análise do comportamento estrutural da barragem, procurou-se diminuir o número de elementos do maciço de fundação. Assim em vez da adopção de elementos hexaédricos para o maciço de fundação, utilizaram-se elementos de 20 nós tetraédricos como mostra a Figura 48, que permitiu a redução do número de nós do modelo completo de 147120 para 47591, dos quais 30977 caracterizam a barragem e 18583 o maciço de fundação. Em contrapartida refinou-se a malha do corpo da barragem, que passou a ser discretizado por quatro elementos à espessura da barragem.

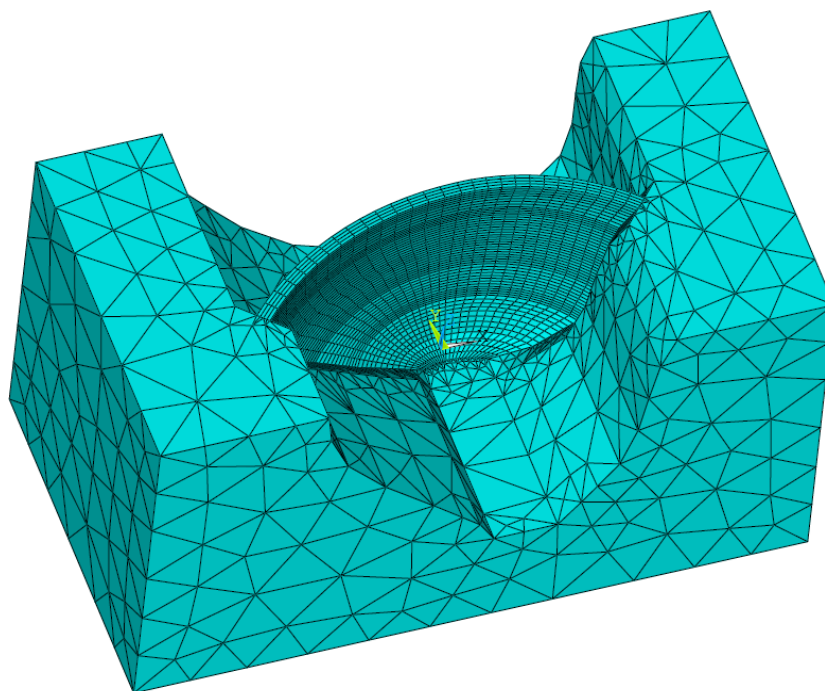


Figura 48 – Malha de elementos finitos utilizada

A malha de elementos finitos utilizada para a análise estrutural, com fundação infinitamente rígida é idêntica à utilizada para o estudo com fundação apresentada anteriormente, como ilustra a Figura 49.

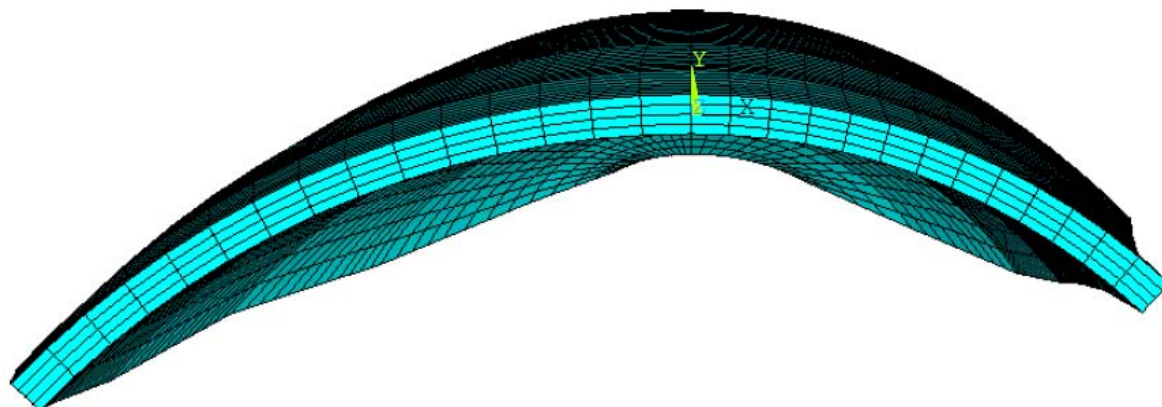


Figura 49 – Malha de elementos finitos do corpo da barragem

4.5. ANÁLISE ESTÁTICA DA BARRAGEM

4.5.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A barragem, assim como a fundação, foram consideradas constituídas por materiais homogêneos e isotrópicos, sendo as suas características térmicas independentes do estado de tensão e as mecânicas definidas para a hipótese de comportamento elástico linear.

As características térmicas e mecânicas do betão do corpo da barragem e do maciço de fundação são apresentadas na Tabela 5. Em termos de projecto foi especificado um valor máximo da tensão principal de compressão de 5.5 MPa e valores máximos de 1.2MPa e 1.0MPa para a tensão principal

de tracção nos paramentos de jusante e montante, respectivamente. Estes limites foram estabelecidos tendo em atenção a composição do BCC utilizado, cuja resistência à compressão aos 90 dias era de 23 MPa o que, de acordo com a prática chinesa permitia admitir um valor máximo de 6.7 MPa para a tensão máxima de compressão (Li, 2007).

Tabela 5 – Resumo das propriedades dos materiais (Li, 2007)

Corpo da Barragem
Peso Próprio: $\gamma=24\text{kN/m}^3$
Módulo de Elasticidade: $E=18.87\text{GPa}$
Coeficiente de Poisson: $\nu=0.18$
Coeficiente de Dilatação Térmica: $\alpha=0.7\times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}$
Valor de cálculo de resistência à Compressão: 5.5MPa
Valor de cálculo de resistência à Tracção: 1.2 a 1.0 MPa
Maciço de Fundação
Peso Próprio: $\gamma=0\text{kN/m}^3$
Módulo de Elasticidade: $E=10\text{--}12\text{GPa}$
Coeficiente de Poisson: $\nu=0.25$

4.5.2. ACÇÕES

Uma das características das barragens relaciona-se com o facto de durante a sua vida útil, estarem sujeitas com um elevado carácter de permanência às acções devidas ao peso próprio, à pressão hidrostática e às variações de temperatura. Deste modo, grande parte dos objectivos de projecto consiste em manter as boas condições de funcionamento e de estanqueidade da barragem para o efeito destas acções, sendo necessário impedir tanto quanto possível o aparecimento de tracções que possam causar a fissuração da barragem em condições de serviço.

A estrutura foi calculada considerando as seguintes acções estáticas:

- A acção do peso próprio (PP) que foi aplicada de uma só vez à estrutura final, hipótese que se afigura adequada dado o método de construção em BCC consistir na elevação dos arcos horizontais da barragem; em barragens abóbada convencionais refere-se que, contrariamente, o procedimento mais correcto dado o método de construção adoptado é considerar o peso próprio aplicado em cada bloco independente;
- A pressão hidrostática (PH) actuante no paramento de montante, supondo o nível da albufeira coincidente com a cota do arco de coroamento da barragem e admitindo para a água um peso específico de 10 kN/m^3 ;
- A variação sinusoidal de temperatura imposta nos dois paramentos da barragem, cujo cálculo foi explicado no Capítulo 3, podendo esta ser um aumento de temperatura (V+) ou uma descida de temperatura (V-).

As hipóteses consideradas para as variações de temperatura foram:

- Caso 1 – variações de temperatura calculadas em relação à temperatura máxima atingida pelo betão em fase construtiva, correspondente à hipótese de não existirem juntas transversais;
- Caso 2-A) – variações de temperatura calculadas para a hipótese de existirem juntas transversais injectadas à temperatura média anual na barragem;

- Caso 2-B) – variações de temperatura calculadas para a hipótese de existirem juntas transversais injectadas a uma temperatura inferior, em 5°C, à temperatura média anual da barragem.

Na Tabela 6 apresenta-se as combinações de acções efectuadas.

Tabela 6 – Combinação de acções

Combinação	1	2	3	4
PP	X	X	X	X
PH		X	X	X
V-			X	
V+				X

4.5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo analisam-se os principais resultados dos cálculos estáticos efectuados, apresentando-se no anexo A2 o conjunto de elementos gráficos considerados mais representativos.

4.5.3.1. Influência da fundação

Os primeiros cálculos efectuados consistiram em avaliar o comportamento da barragem com e sem maciço de fundação, sob a acção das combinações 1 e 2. Um primeiro conjunto de cálculos foi efectuado considerando a barragem perfeitamente encastrada na fundação (fundação rígida), e outro conjunto de cálculos foi efectuado fazendo intervir na análise o maciço de fundação envolvente. Na Figura 50 representam-se os deslocamentos horizontais, da consola central para a solicitação única do peso próprio. Esta figura mostra que nesta fase, a estrutura apresenta um ligeiro deslocamento para montante, benéfico para as solicitações futuras, como a pressão hidrostática, verificando-se como era de esperar maiores deslocamentos quando é considerada a rocha de fundação envolvente.

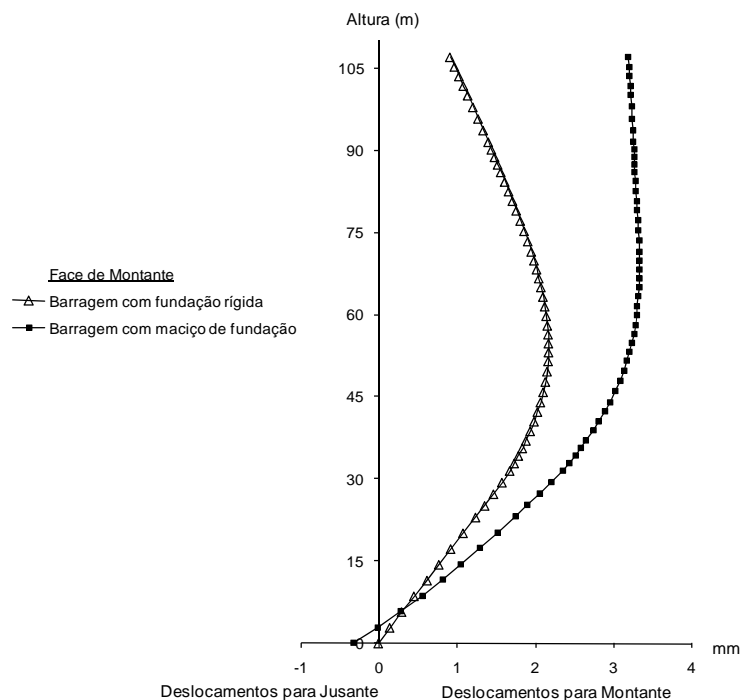


Figura 50 – Deslocamentos horizontais da consola central a montante para a combinação 1

Nas Figura 51 e Figura 52 ilustram-se respectivamente, a distribuição de tensões na direcção dos arcos e das consolas, ao longo da consola central. Os gráficos foram realizados a partir dos resultados obtidos nos nós de montante e de jusante para as condições de fundação rígida e com maciço de fundação. Os resultados obtidos mostram o aparecimento de tensões de tracção (de valor moderado) na direcção dos arcos a montante e de compressão a jusante, aproveitando-se deste modo os benefícios da forma da secção transversal da barragem para contrariar as acções posteriores. Na direcção vertical e na base da consola central salienta-se o não aparecimento de tensões de tracção a jusante e valores de compressão a montante entre 4 a 5 MPa.

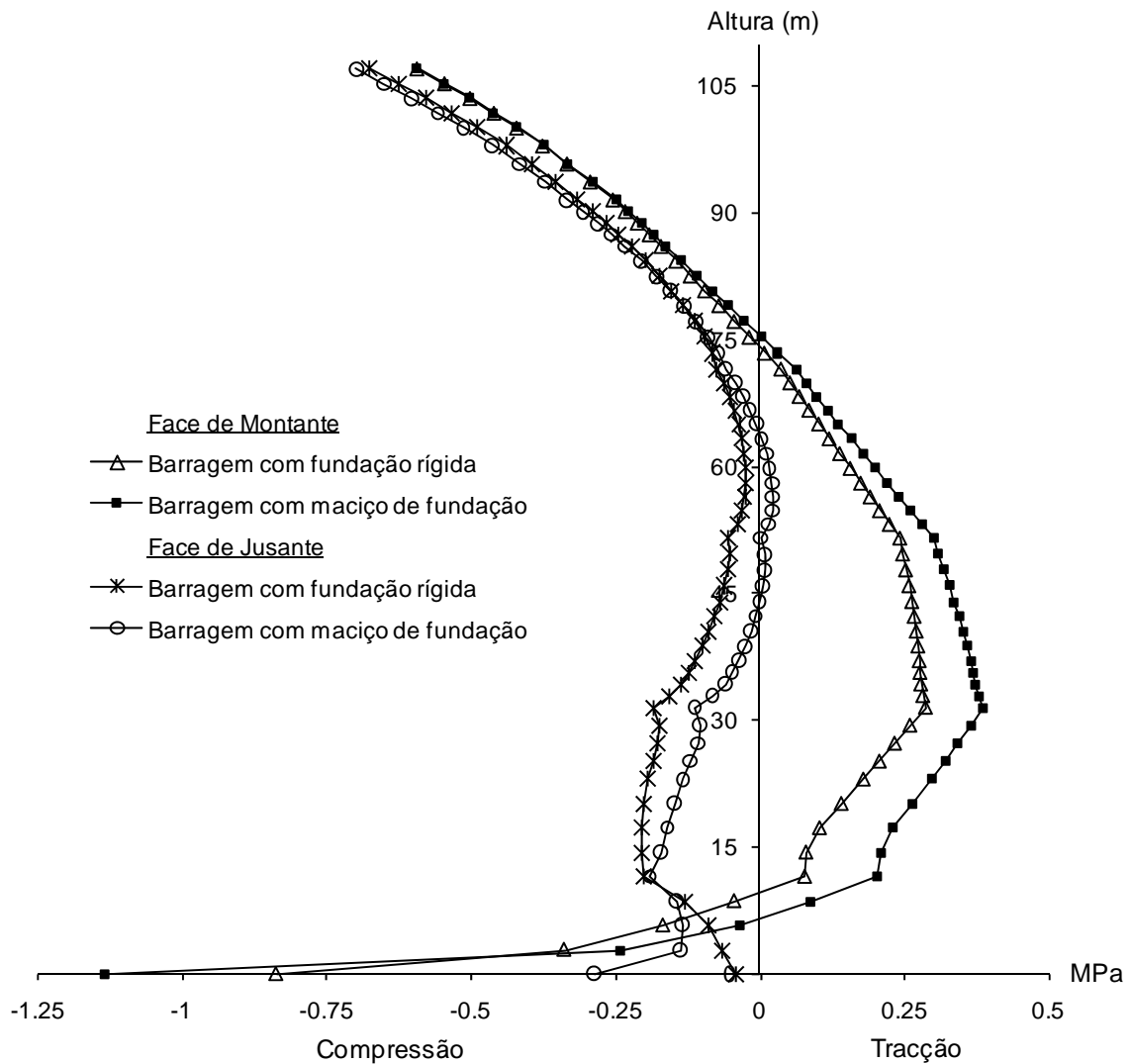


Figura 51 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos para a combinação 1

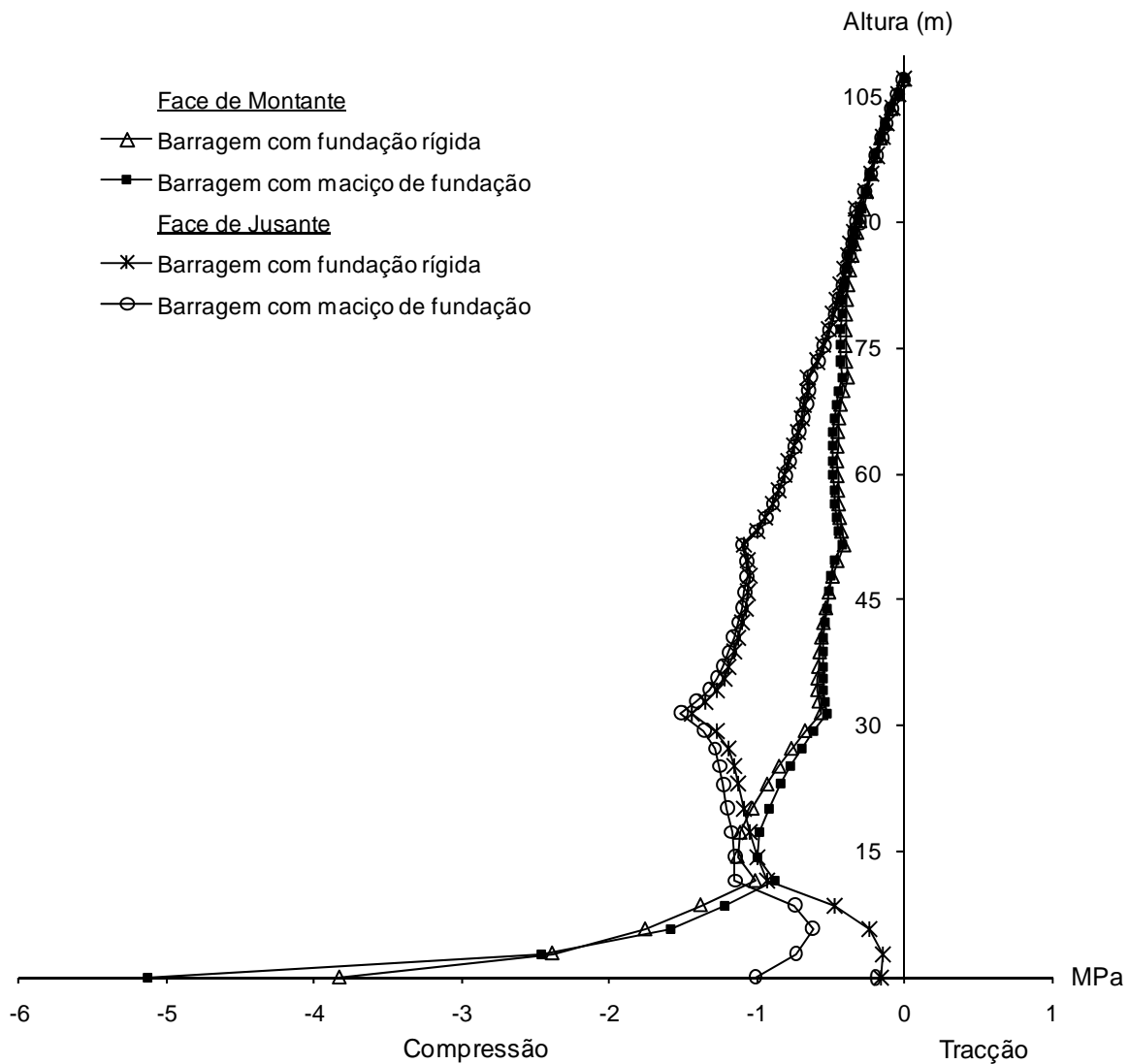


Figura 52 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas para a combinação 1

Apresentam-se também os resultados obtidos na análise estática da barragem considerando como acções actuantes o peso próprio da estrutura e a pressão hidrostática. O cálculo foi efectuado em condições idênticas às anteriormente referidas para a acção do peso próprio. Na Figura 53 apresentam-se os deslocamentos horizontais da consola central sendo que estes, tal como era previsível, são dirigidos para jusante, e apresentam maiores valores para o caso de se considerar o maciço de fundação deformável.

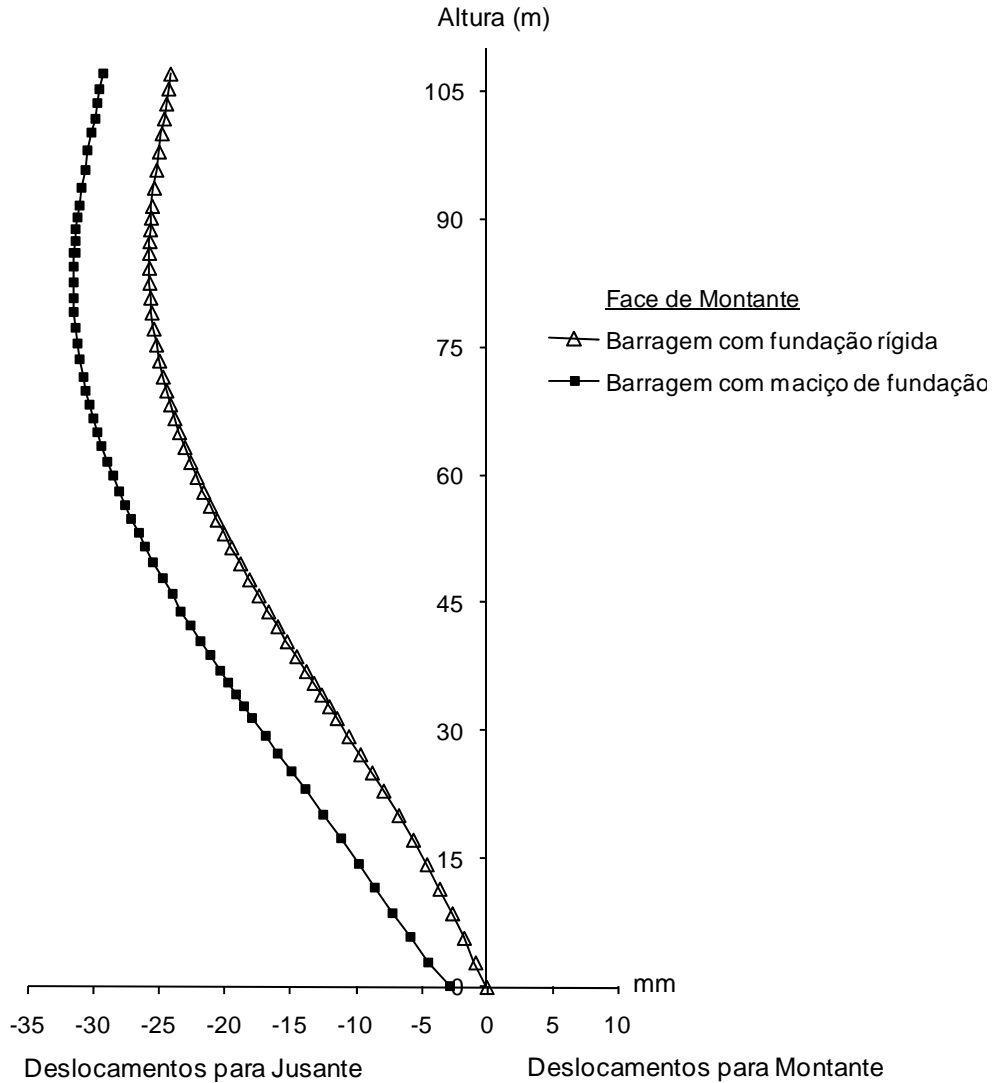


Figura 53 – Deslocamentos horizontais da consola central a montante para a combinação 2

Seguidamente, ilustram-se nas Figura 54 e Figura 55 a distribuição de tensões na direcção dos arcos e das consolas respectivamente, ao longo da consola central. Estas figuras permitem observar que existem tensões de tracção muito elevadas junto ao pé da barragem, no paramento de montante atingindo cerca de 8 MPa no modelo com fundação rígida e cerca de 5MPa no modelo incorporando o maciço de fundação. Refere-se no entanto que este resultado vem influenciado pelo facto de se ter utilizado a interpolação dos resultados obtidos nos pontos de Gauss para os nós dos elementos. Porém dado existir gradientes de tensão muito elevados nesta zona considera-se que os valores obtidos nos pontos de Gauss seriam mais representativos da realidade. É também possível a partir destas figuras, constatar que não se ultrapassou a resistência máxima à compressão especificada. Os gráficos mostram que as compressões são mais elevadas no caso com maciço de fundação, atingindo-se um máximo com cerca de 5MPa na direcção dos arcos, no paramento de montante a uma altura aproximada de 60 m acima do contacto com a fundação e também com cerca de 5MPa na direcção das consolas, no pé da barragem no paramento de jusante.

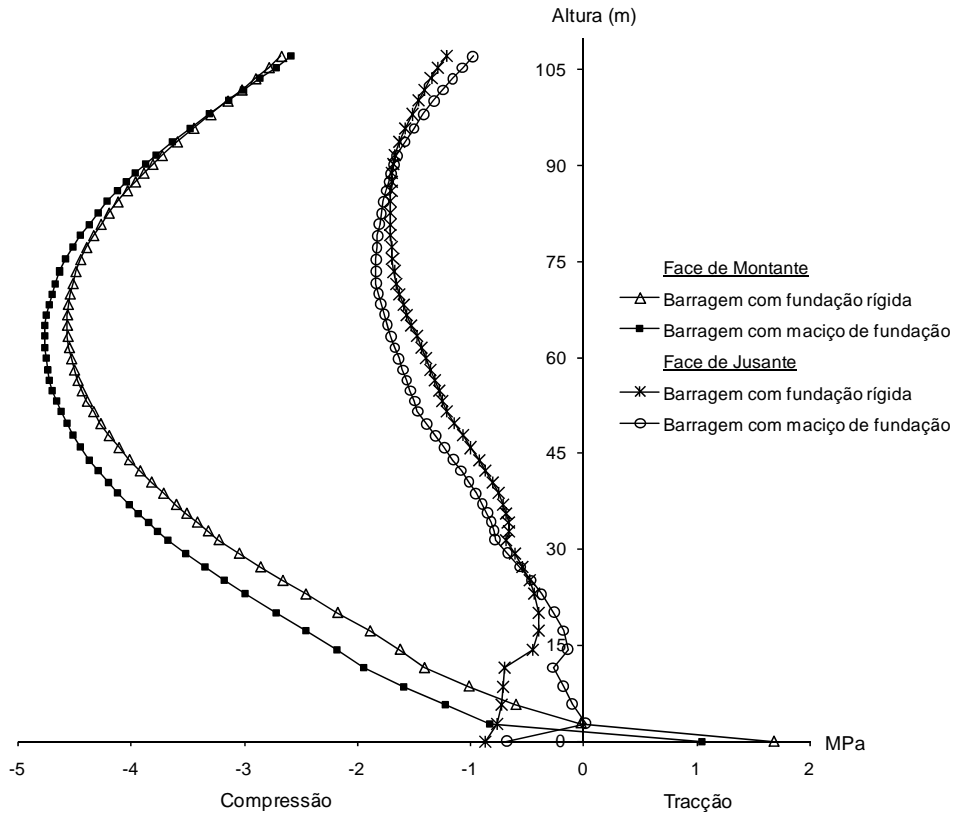


Figura 54 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos para a combinação 2

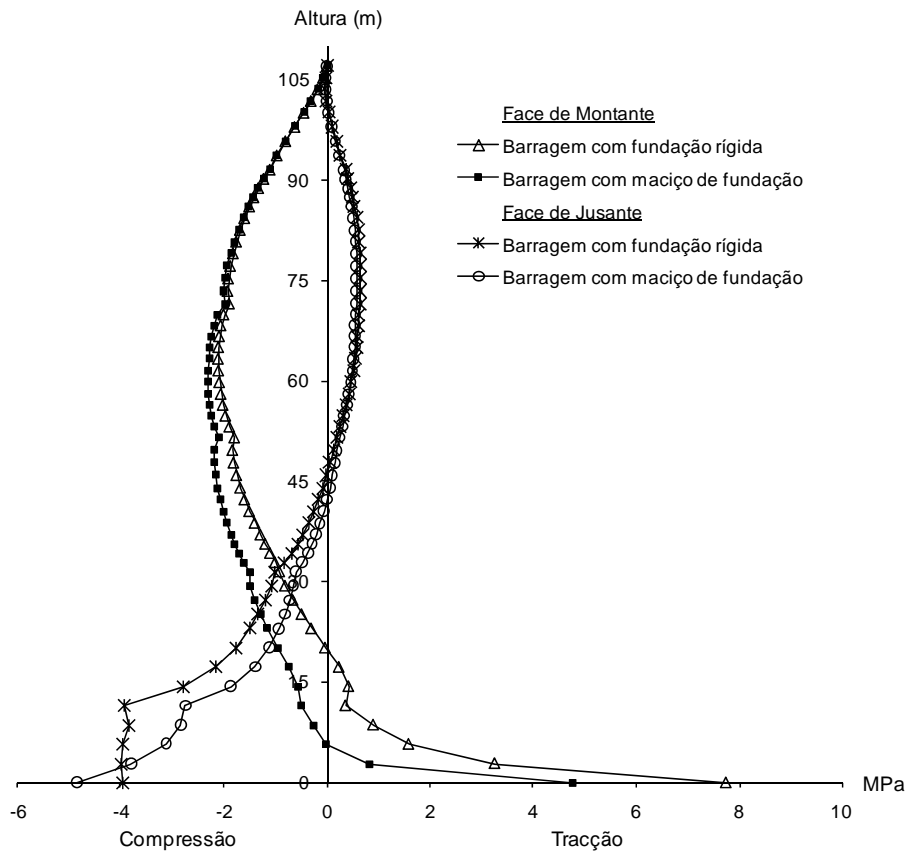


Figura 55 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas para a combinação 2

4.5.3.2. Análise global dos resultados obtidos

Feita a análise da influência da introdução do maciço de fundação na análise da estrutura, efectua-se neste ponto a comparação dos resultados obtidos e apresentados no anexo A2 para as quatro combinações efectuadas, considerando a barragem ligada ao maciço de fundação envolvente. Efectua-se também uma comparação com os resultados apresentados por Li Haitao (Li, 2007) relativos a esta barragem.

Da Tabela 7, onde se expõe os resultados máximos obtidos para cada situação, é possível observar que em todas as situações se ultrapassa os valores máximos das tensões admitidas para o betão. Embora se verifiquem apenas em zonas localizadas, na zona de ligação da abóbada à fundação ou nos encontros, estas tensões de tracção e de compressão não são desprezáveis. Releva-se também o agravamento dos valores pelo facto de se ter extrapolado os resultados nos pontos de Gauss para os nós dos elementos, em articulação com a discretização adoptada no modelo para esta zona singular da obra.

Tabela 7 – Valores máximos das tensões principais mínimas e máximas

		Caso1		Caso 2-A)		Caso 2-B)	
		V-	V+	V-	V+	V-	V+
Tensões Principais Máximas (Tracções)	(Mpa)	12.6	11.2	8.3	6.9	5.6	4.3
Tensões Principais Mínimas (Compressões)	(Mpa)	-10.7	-11.0	-10.5	-10.9	-10.4	-10.9

Outra constatação feita a partir da Tabela 7 é que as tensões instaladas na barragem são mais condicionantes nos meses de menor temperatura, dado se verificar um aumento significativo das tensões de tracção no corpo da barragem.

Também se verifica, como era de esperar pela dimensão da barragem, que a construção sem juntas de contracção e sem pós-arrefecimento (Caso 1) não é uma solução viável. Isto deve-se ao facto de se atingirem temperaturas demasiado elevadas durante a construção como se apresenta no anexo A1, chegando-se a atingir temperaturas de 35 °C na cota 51.5 m. Assim, estas barragens devem ser munidas de juntas que abrem com a libertação de calor, e se necessário adoptar um sistema de pós-arrefecimento.

Da comparação do caso 2-A e 2-B, é notável o efeito benéfico do pós-arrefecimento no comportamento estrutural da barragem, que permite reduzir consideravelmente as tensões de tracção no corpo da barragem.

Como já se referiu, Li Haitao (Li, 2007) apresenta alguns resultados quanto ao cálculo desta barragem, efectuado pelo método dos arcos e consolas (TL - Trial Load) e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) que se apresenta na Tabela 8. Contudo não são referidas as hipóteses assumidas para o cálculo das variações de temperatura e admite-se que no modelo de elementos finitos possa ter sido considerado o sistema de juntas da barragem, e terem sido adoptados elementos de junta na ligação

entre a barragem e a fundação. Estes factos poderão, de certo modo, justificar a discrepância de resultados em relação aos obtidos com o modelo desenvolvido neste trabalho.

Tabela 8 – Resultados das tensões principais (Li, 2007)

		Nível normal na albufeira + Descida de Temperatura		Nível máximo na albufeira + Aumento de Temperatura		Nível mínimo na albufeira + Aumento de Temperatura	
		TL	MEF	TL	MEF	TL	MEF
Tensões Principais Máximas (Tracções)	(Mpa)	0.93	1.15	1.21	1.14	1.04	1.11
Tensões Principais Mínimas (Compressões)	(Mpa)	-5.04	-6.74	-5.74	-7.45	-2.92	-4.66

Neste artigo Li Haitao também refere que as tensões principais mínimas (compressões) no paramento de montante são de 4.8 MPa e que as tensões principais máximas (tracções) são de 1.07 MPa no paramento de jusante. Estes valores são relativamente próximos dos valores obtidos nesta análise caso não se consideram as zonas próximas do contacto barragem-fundação, conforme se evidencia na Tabela 9.

Tabela 9 – Tensões principais não considerando as zonas próximas do contacto barragem-fundação

		Caso1		Caso 2-A)		Caso 2-B)	
		V-	V+	V-	V+	V-	V+
Tensões Principais Máximas (Tracções)	(Mpa)	2.3	1.8	0.8	0.7	0.7	0.6
Tensões Principais Mínimas (Compressões)	(Mpa)	-5.7	-5.2	-5.2	-4.7	-5.0	-4.5

Portanto, apesar de no modelo desenvolvido se verificarem valores de tensões demasiado elevadas no contacto da barragem com a fundação admite-se que esses valores estejam sobrestimados, em termos de projecto, pela não consideração do sistema de juntas real existente na barragem nem pela adopção de elementos de junta para uma melhor simulação do contacto barragem-fundação.

Como notas marginais, anota-se que nas conclusões do artigo (Li, 2007) o autor salienta que a definição geométrica dos arcos da barragem por meio de espirais logarítmicas se mostrou adequada

para fazer face à assimetria topográfica e geológica do vale, refere a excelente qualidade de construção e que os méritos associados à rapidez de construção e à diminuição dos custos de investimento terão conduzido a uma redução de custos da ordem de 10 milhões de Yuan (cerca de 1.15 milhões de Euros) quando comparada com a adopção de outras soluções, como barragens abóbada em betão convencional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência da exposição detalhada deste trabalho, que procura contribuir para divulgar e melhorar os conhecimentos acerca da construção de barragens abóbada em betão compactado com cilindros, apresentam-se neste capítulo os aspectos principais a retirar deste trabalho.

Após algumas realizações de barragens arco-gravidade, com volumes significativos na África do Sul na década de 80 do século passado, esta tecnologia de construção verificou um crescente desenvolvimento na China, com a construção das barragens de Puding e de Shapai. Os conhecimentos adquiridos pela elaboração destas obras permitiram evoluir nos últimos anos, para formas mais esbeltas que se aproximam das barragens abóbada construídas em betão convencional vibrado, pelo que se considera que as barragens abóbada em BCC constituem uma solução alternativa para este tipo de obras, e eventualmente mais competitivas em termos de custo final. A construção destas barragens só se tornou possível pela adaptação dos conhecimentos sobre o material BCC adquiridos na construção de barragens gravidade, tal como os métodos de colocação e compactação do betão, ligação entre camadas de BCC bem como as técnicas de impermeabilização do paramento de montante, podendo agora ser aplicados em barragens abóbadas com maior fiabilidade.

Após algumas realizações sem juntas transversais como a barragem de Puding, onde apareceram fissuras apesar dos indutores de juntas, verificou-se a necessidade da implementação de juntas transversais. Este tipo de juntas em barragens abóbada de BCC foi introduzido pela primeira vez na barragem de Shapai, com a formação de juntas transversais e induzidas, formadas através de blocos pré-fabricados de betão com possibilidade de injeção ou re-injeção, o que constituiu uma inovação. A sua utilização nesta obra foi um êxito, pois após a abertura das juntas devido a libertação de calor, as juntas foram continuamente injectadas até o comportamento da barragem estabilizar, pelo que é agora utilizado com regularidade em barragens abóbada em BCC. Foram também adaptados os métodos de pós arrefecimento usuais nas barragens abóbada convencionais, agora com a utilização de serpentinas em PVC para facilitar a disposição e as ligações. Também é de realçar, que com o desenvolvimento das formas das barragens cada vez mais semelhante ou iguais às de betão convencional, desenvolveu-se e passou-se a utilizar cofragens que se adaptam à curvatura vertical das abóbadas e ao ritmo construtivo, como foi o caso na barragem de Zhaolaihe.

Também se regista que as facilidades de cálculo existentes permitem simular por via numérica (método dos elementos finitos) a evolução térmico-tensional de barragens em BCC na fase construtiva. Na fase de projecto subsiste contudo uma grande dificuldade no conhecimento, com a precisão adequada, das propriedades térmico-mecânicas do betão e das incertezas relativas às condições de construção.

Neste trabalho igualmente se apontou que no estudo comparativo de uma barragem abóbada construída em BCC e em betão convencional, devido à maior incorporação de cinzas e às menores dosagens de cimento, na barragem em BCC as temperaturas máximas e os gradientes térmicos nos paramentos obtidos na fase construtiva são menores e aparecem mais tarde. As tensões máximas de tracção são também menores afigurando-se compatíveis com o desenvolvimento da resistência do BCC que também é mais retardado. Este estudo permite concluir ser possível adoptar em barragens abóbada BCC um espaçamento entre juntas transversais superior ao adoptado em barragens abóbada em betão convencional (BC).

Verificou-se ainda que no caso de barragens abóbada em BCC realizadas com juntas transversais, o modelo para o cálculo das variações de temperatura em fase de exploração é semelhante ao das barragens em BC.

Neste trabalho, também se procedeu à análise estrutural em fase de exploração da barragem abóbada em BCC de Zhaolaihe (China). Os resultados mostram que os valores máximos das tensões nos paramentos de montante e de jusante afiguram-se como espectáveis face às formas da barragem, apenas se verificando tensões elevadas em alguns pontos singulares no contacto com a fundação. De acordo com a informação de base consultada para a realização desta análise, verifica-se ser possível projectar um BCC capaz de resistir aos valores das tensões instaladas com coeficientes de segurança adequados.

Dos elementos consultados e do trabalho efectuado citam-se dois aspectos que, embora não detalhados no presente trabalho, se julga merecerem atenção especial e estudos mais aprofundados:

- A evolução das propriedades térmicas e mecânicas do BCC em fase construtiva, nomeadamente a evolução da resistência, do módulo de elasticidade e da lei de fluência em função do tempo/temperatura;
- A verificação das condições de segurança entre as camadas de BCC de barragens abóbada para acções estáticas e dinâmicas.

BIBLIOGRAFIA

ANSYS, (2007) Ansys®/Multiphysics, Inc. Company.

Army Corps of Engineers, (1994). *Arch Dam Design – Engineer Manual N° 1110-2-2201*. Department of the U. S. Army Corps of Engineers, Washington.

Azenha, M., Faria R., Ferreira D. (2008). *Monitorização e simulação numérica do processo construtivo de uma barragem gravidade em betão*. In: Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008 (Lourenço et al, eds. lit.), 5-7 November 2008, Guimarães.

Bofang, Z., (2003). *Temperature control and design of joints for RCC arch dams*. In: “Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al, eds. lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 409 - 415, Swets & Zeitlinger, Lisse.

Bofang, Z., Zhanmei, L. (1990). *Thermal Stresses*. In: “Arch Dams”, International Workshop on Arch Dams (Serafim, J. L., Clough, R. W., eds. lit.), 5-9 April 1987, Coimbra, pages 217 - 225, A. A. Balkema, Rotterdam.

Bourgin, A., (1955). *Cours de calcul de barrages*. Editions Eyrolles, Paris.

Canet, J. M., (1991). *Análisis dinámico de presas*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.

Carrère, A. J., (2006). *Trends and new ideas on the development of RCC arch dams*. Hydropower & Dams, Issue Five, pages 132 - 137

Dunstan, M. R. H., (2007). *Overview of RCC Dams at the End of 2006*. In: “New Progress on Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Five International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Jinsheng et al, eds. lit.), 2- 4 November 2007, Guiyang, pages 9 - 17, China WaterPower Prees.

Li, H., (2007). *Design and Practice of Zhaolaihe Roller Compacted Concrete Double-Curvature Thin Arch Dam*. In: “New Progress on Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Five International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Jinsheng et al, eds. lit.), 2- 4 November 2007, Guiyang, pages 243 - 248, China WaterPower Prees.

Nilipour, N., Wohnlich, A. (2006). *Thermo-mechanical comparison of RCC method and convencional method of construction of arch dams*. In: “Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century”, Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, ICOLD-SPANCOLD (Berga et al, eds. lit.), 18 June 2006, Barcelona, pages 881 - 887, Taylor & Francis, London.

Qiuhua, C., (2003). *New design method of RCC high arch dam*. In: “Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al, eds. lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 427 - 430, Swets & Zeitlinger, Lisse.

Ribeiro, A. C. B. S., (1998). *Betão compactado com cilindros*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Santana, M. T. T. G., (1996). *Barragens de betão compactado com cilindros*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Shen, C., (2003). *RCC dams in China*. In: “Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al, eds. lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 15 - 25, Swets & Zeitlinger, Lisse.

Shen, C., (2007). Developments of Roller Compacted Concrete Dams. In *Large Dams in China*. Pages 485-538, Chinese National Committee on Large Dams, Beijing.

Shengpei, W., (2007). *The technology development of RCC dam construction in China*. In: “New Progress on Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Five International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Jinsheng et al, eds. lit.), 2- 4 November 2007, Guiyang, pages 41 - 51, China WaterPower Press.

Silveira, A. F., (1961). *As variações de temperatura nas barragens*. Memória nº 177, LNEC, Lisboa.

Sinohydro, E. B., (2007). *Construction Record of Dahuashui Hydropower Station and Silin Hydropower Station*. Higher and Faster, November 2007, pages 1 - 18

Stucky, S. C., (2006). *RCC arch dam technique tested in Brazil*. World Water and Environmental Engineering, July 2006, pages 14 - 15

Teles, M. M. M. S., (1985). *Comportamento térmico de barragens de betão*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

http://traianvs.net/textos/archdams_fr.htm. Acedido em 09/01/2009

Anexos

A1

RESUMO DO CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EFECTUADO PARA OS DOIS CASOS EM ESTUDO

TABELA 1 - BARRAGEM CONSTRUÍDA SEM JUNTAS DE CONTRAÇÃO E SEM ARREFECIMENTO ARTIFICIAL (CASO 1)

Elevação (m)	0	11.5	23	31.5	37	44	51.5	58	65	71.5	79	86	91.5	100	107
Espessura (m)	18.50	16.83	15.31	14.18	13.60	12.86	12.07	11.40	10.67	10.00	9.06	8.19	7.50	6.68	6.00
Coefficiente N	0.81	0.79	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.60	0.58	0.53
Aumento de temperatura Tr (°C)	12.98	12.66	12.34	12.18	12.02	11.85	11.69	11.53	11.21	10.89	10.57	10.25	9.61	9.29	8.49
Mês de Colocação	Janeiro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
Temperatura de colocação (°C)	5.93	5.93	8.28	12.35	17.05	21.12	23.47	23.47	21.12	17.05	12.35	8.28	5.93	5.93	8.28
$T_{m0}=T_p+T_r$	18.91	18.59	20.61	24.53	29.07	32.98	35.17	35.01	32.33	27.94	22.92	18.53	15.54	15.22	16.77
T_{d0}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{m1}	14.70	14.72	14.75	14.78	14.81	14.86	14.94	15.02	15.13	15.27	15.49	15.76	16.03	16.58	17.20
T_{d1}	6.01	5.97	5.90	5.83	5.77	5.67	5.53	5.36	5.13	4.85	4.42	3.89	3.35	2.24	1.00
T_{m2}	1.34	1.49	1.67	1.84	1.94	2.08	2.27	2.45	2.69	2.96	3.65	4.36	4.99	6.10	7.66
T_{d2}	4.71	4.83	4.90	4.89	4.84	4.71	4.50	4.21	3.75	3.15	2.83	2.45	2.05	-0.97	0.96
Varição de temperatura no Inverno (°C)															
T_m	-5.55	-5.36	-7.54	-11.58	-16.19	-20.19	-22.50	-22.44	-19.89	-15.63	-11.09	-7.14	-4.51	-4.74	-7.23
T_d	1.30	1.13	1.01	0.94	0.94	0.96	1.03	1.16	1.38	1.70	1.59	1.44	1.30	3.21	0.04
Varição de temperatura no Verão (°C)															
T_m	-2.87	-2.38	-4.19	-7.90	-12.31	-16.03	-17.96	-17.53	-14.51	-9.71	-3.78	1.59	5.48	7.46	8.09
T_d	10.72	10.80	10.80	10.72	10.61	10.38	10.02	9.57	8.89	8.00	7.25	6.34	5.40	1.27	1.96
Varição de temperatura no Inverno (°C)															
$T_{Montante}$	-6.20	-5.93	-8.04	-12.05	-16.66	-20.67	-23.01	-23.02	-20.58	-16.48	-11.88	-7.86	-5.16	-6.35	-7.25
$T_{Jusante}$	-4.90	-4.80	-7.04	-11.11	-15.72	-19.72	-21.98	-21.86	-19.20	-14.78	-10.29	-6.42	-3.86	-3.14	-7.21
Varição de temperatura no Verão (°C)															
$T_{Montante}$	-8.23	-7.78	-9.59	-13.27	-17.62	-21.22	-22.97	-22.32	-18.95	-13.71	-7.41	-1.58	2.78	6.82	7.11
$T_{Jusante}$	2.49	3.03	1.21	-2.54	-7.01	-10.84	-12.95	-12.75	-10.07	-5.71	-0.16	4.75	8.18	8.10	9.07

TABELA 2 – BARRAGEM CONSTRUÍDA COM JUNTAS DE CONTRACÇÃO INJECTADAS A TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (CASO 2-A)

Elevação (m)	0	11.5	23	31.5	37	44	51.5	58	65	71.5	79	86	91.5	100	107	
Espessura (m)	18.50	16.83	15.31	14.18	13.60	12.86	12.07	11.40	10.67	10.00	9.06	8.19	7.50	6.68	6.00	
T_{m1} (°C)	14.70	14.72	14.75	14.78	14.81	14.86	14.94	15.02	15.13	15.27	15.49	15.76	16.03	16.58	17.20	
T_{d1} (°C)	6.01	5.97	5.90	5.83	5.77	5.67	5.53	5.36	5.13	4.85	4.42	3.89	3.35	2.24	1.00	
T_{m2} (°C)	1.34	1.49	1.67	1.84	1.94	2.08	2.27	2.45	2.69	2.96	3.65	4.36	4.99	6.10	7.66	
T_{d2} (°C)	4.71	4.83	4.90	4.89	4.84	4.71	4.50	4.21	3.75	3.15	2.83	2.45	2.05	0.97	-0.96	
Variações de temperatura no Inverno																
Com $T_{m0}=T_{m1}$ e $T_{d0}=0^{\circ}\text{C}$																
T_m (°C)	-1.34	-1.49	-1.67	-1.84	-1.94	-2.08	-2.27	-2.45	-2.69	-2.96	-3.65	-4.36	-4.99	-6.10	-7.66	
T_d (°C)	1.30	1.13	1.01	0.94	0.94	0.96	1.03	1.16	1.38	1.70	1.59	1.44	1.30	1.27	1.96	
Variações de temperatura no Verão																
Com $T_{m0}=T_{m1}$ e $T_{d0}=0$																
T_m (°C)	1.34	1.49	1.67	1.84	1.94	2.08	2.27	2.45	2.69	2.96	3.65	4.36	4.99	6.10	7.66	
T_d (°C)	10.72	10.80	10.80	10.72	10.61	10.38	10.02	9.57	8.89	8.00	7.25	6.34	5.40	3.21	0.04	
Variações de temperatura no Inverno																
T_{Montante} (°C)	-1.99	-2.06	-2.18	-2.31	-2.41	-2.56	-2.78	-3.03	-3.38	-3.81	-4.45	-5.08	-5.64	-6.74	-8.64	
T_{Jusante} (°C)	-0.69	-0.93	-1.17	-1.37	-1.47	-1.60	-1.75	-1.87	-2.00	-2.11	-2.86	-3.64	-4.35	-5.47	-6.68	
Variações de temperatura no Verão																
T_{Montante} (°C)	-4.02	-3.91	-3.73	-3.53	-3.37	-3.11	-2.75	-2.33	-1.75	-1.04	0.02	1.20	2.29	4.50	7.64	
T_{Jusante} (°C)	6.70	6.90	7.07	7.20	7.24	7.28	7.28	7.24	7.14	6.96	7.28	7.53	7.69	7.71	7.68	

TABELA 3 – BARRAGEM CONSTRUÍDA COM JUNTAS DE CONTRACÇÃO INJECTADAS A TEMPERATURA MÉDIA ANUAL MENOS 5 °C (CASO 2-B)

Elevação (m)	0	11.5	23	31.5	37	44	51.5	58	65	71.5	79	86	91.5	100	107	
Espessura (m)	18.50	16.83	15.31	14.18	13.60	12.86	12.07	11.40	10.67	10.00	9.06	8.19	7.50	6.68	6.00	
T_{m1} (°C)	14.70	14.72	14.75	14.78	14.81	14.86	14.94	15.02	15.13	15.27	15.49	15.76	16.03	16.58	17.20	
T_{d1} (°C)	6.01	5.97	5.90	5.83	5.77	5.67	5.53	5.36	5.13	4.85	4.42	3.89	3.35	2.24	1.00	
T_{m2} (°C)	1.34	1.49	1.67	1.84	1.94	2.08	2.27	2.45	2.69	2.96	3.65	4.36	4.99	6.10	7.66	
T_{d2} (°C)	4.71	4.83	4.90	4.89	4.84	4.71	4.50	4.21	3.75	3.15	2.83	2.45	2.05	0.97	-0.96	
Variações de temperatura no Inverno																
Com $T_{m0}=T_{m1}-5^{\circ}\text{C}$ e $T_{d0}=0^{\circ}\text{C}$																
T_m (°C)	3.66	3.51	3.33	3.16	3.06	2.92	2.73	2.55	2.31	2.04	1.35	0.64	0.01	-1.10	-2.66	
T_d (°C)	1.30	1.13	1.01	0.94	0.94	0.96	1.03	1.16	1.38	1.70	1.59	1.44	1.30	1.27	1.96	
Variações de temperatura no Verão																
Com $T_{m0}=T_{m1}+5^{\circ}\text{C}$ e $T_{d0}=0^{\circ}\text{C}$																
T_m (°C)	6.34	6.49	6.67	6.84	6.94	7.08	7.27	7.45	7.69	7.96	8.65	9.36	9.99	11.10	12.66	
T_d (°C)	10.72	10.80	10.80	10.72	10.61	10.38	10.02	9.57	8.89	8.00	7.25	6.34	5.40	3.21	0.04	
Variações de temperatura no Inverno																
T_{Montante} (°C)	3.01	2.94	2.82	2.69	2.59	2.44	2.22	1.97	1.62	1.19	0.55	-0.08	-0.64	-1.74	-3.64	
T_{Jusante} (°C)	4.31	4.07	3.83	3.63	3.53	3.40	3.25	3.13	3.00	2.89	2.14	1.36	0.65	-0.47	-1.68	
Variações de temperatura no Verão																
T_{Montante} (°C)	0.98	1.09	1.27	1.47	1.63	1.89	2.25	2.67	3.25	3.96	5.02	6.20	7.29	9.50	12.64	
T_{Jusante} (°C)	11.70	11.90	12.07	12.20	12.24	12.28	12.28	12.24	12.14	11.96	12.28	12.53	12.69	12.71	12.68	

A2

**RESULTADOS RELEVANTES OBTIDOS NA ANÁLISE
ESTÁTICA EFECTUADA A BARRAGEM DE
ZHAOLAIHE PARA AS COMBINAÇÕES EFECTUADAS**

ÍNDICE

A2.1. COMBINAÇÃO 1 (PP)	5
A2.2. COMBINAÇÃO 2 (PP+PH)	10
A2.3. COMBINAÇÃO 3 (PP+PH+V-)	18
A2.3.1. CASO 1	18
A2.3.2. CASO 2 A)	26
A2.3.3. CASO 2 B)	34
A2.4. COMBINAÇÃO 4 (PP+PH+V+)	42
A2.4.1. CASO 1	42
A2.4.2. CASO 2 A)	50
A2.4.3. CASO 2 B)	58

A2.1. COMBINAÇÃO 1 (PP)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.786E-05
SMN =-5.688
SMX =1.06

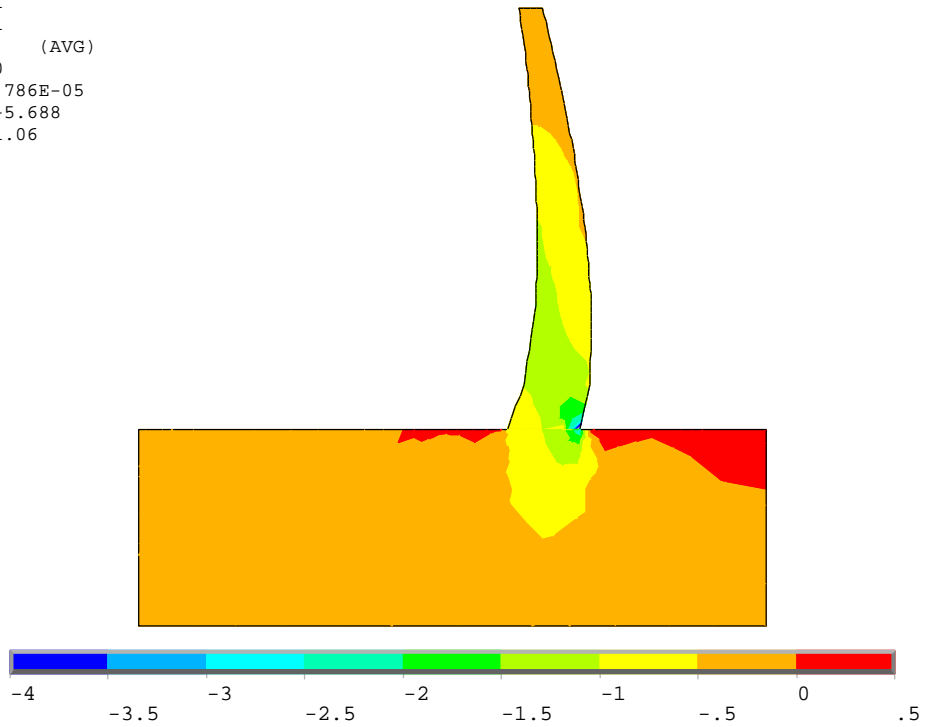


Figura 1 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX = .783E-05
SMN = -1.336
SMX = 1.798

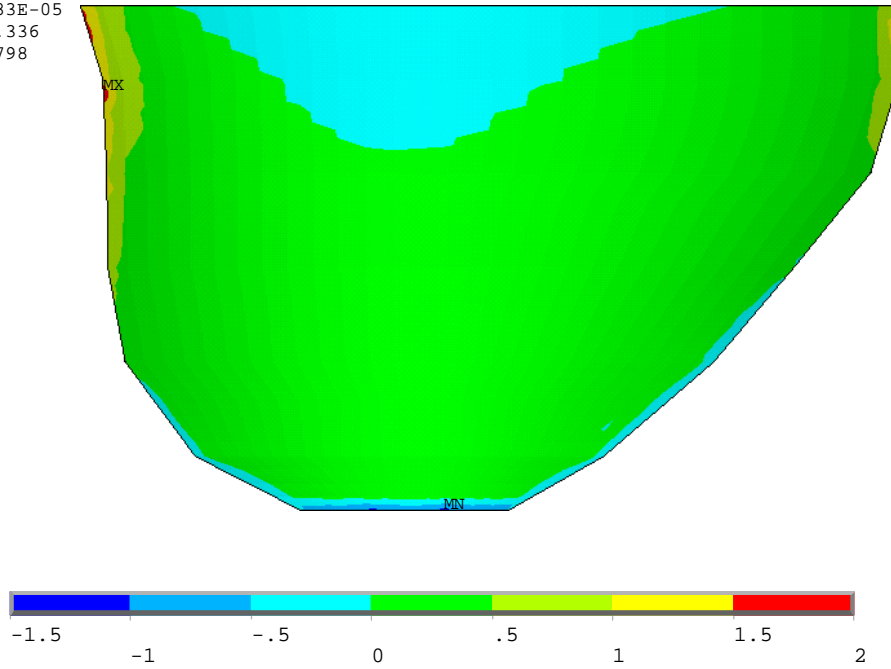


Figura 2 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

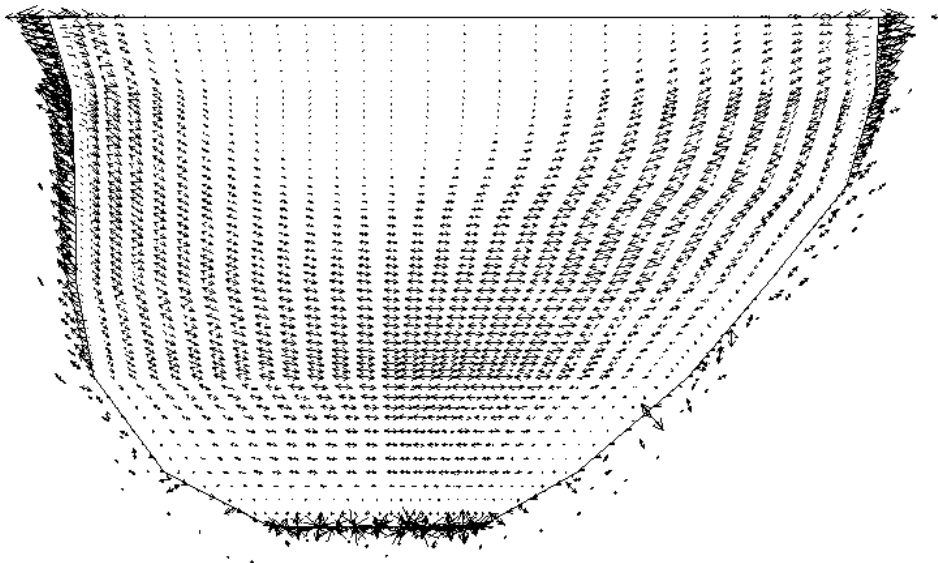


Figura 3 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

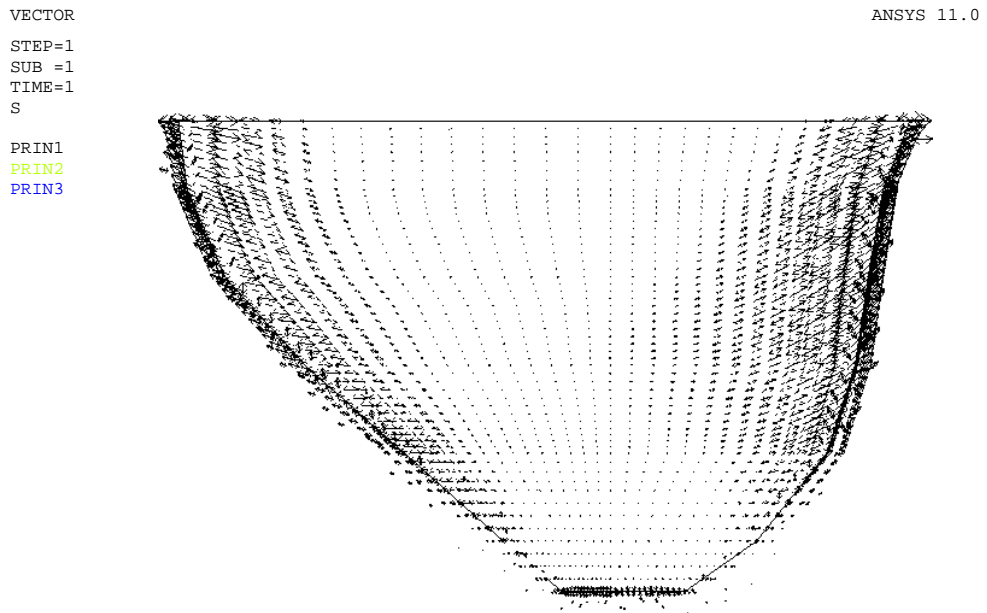
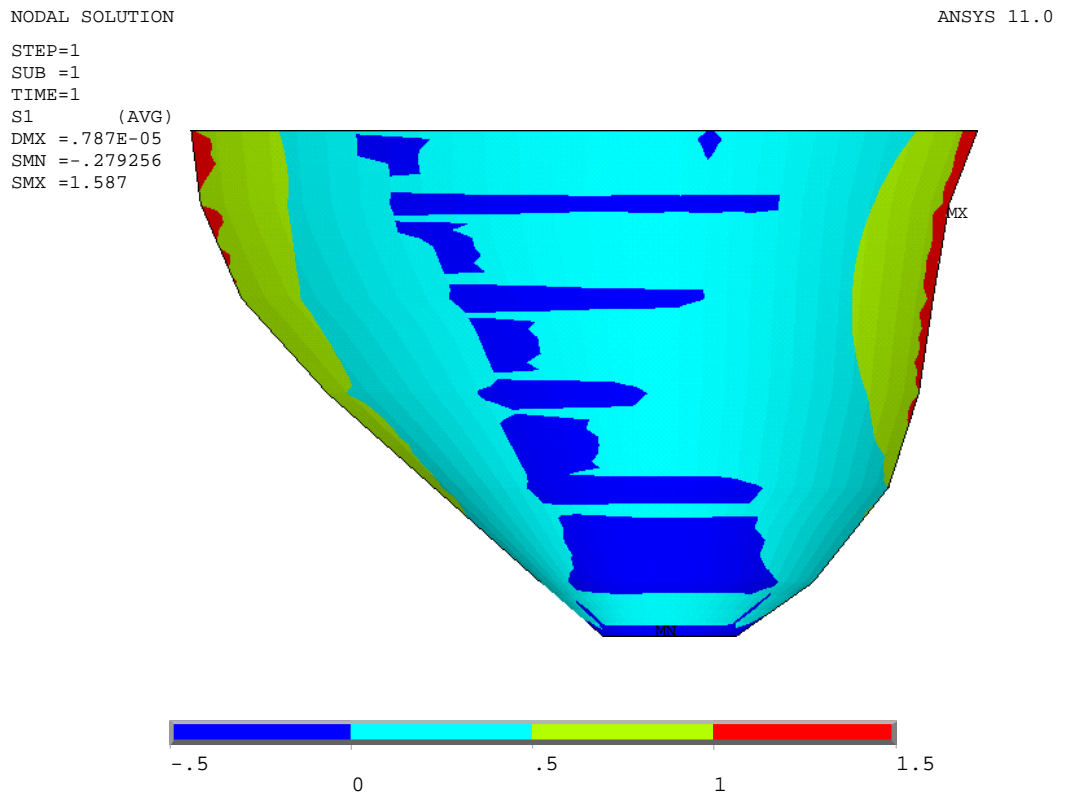


Figura 5 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

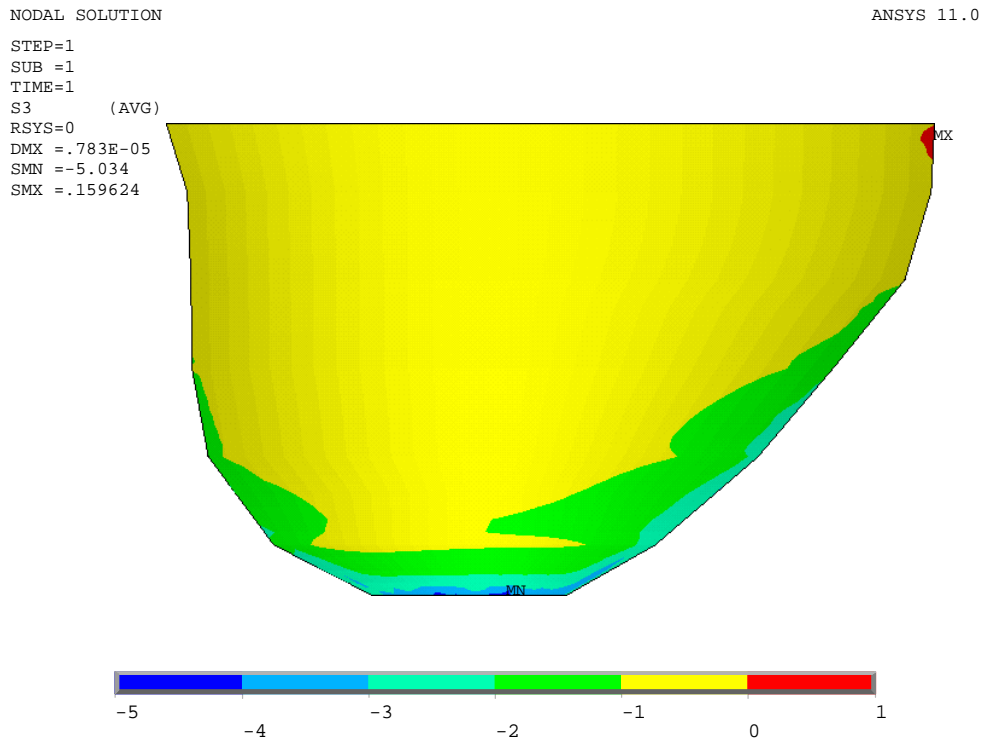


Figura 6 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

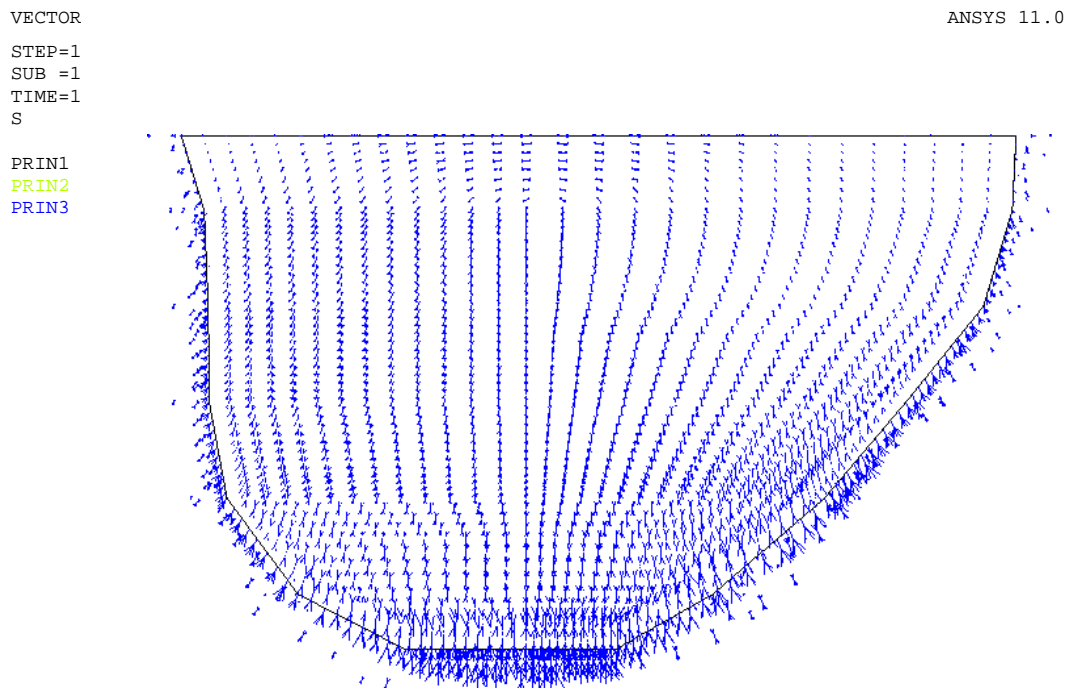


Figura 7 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

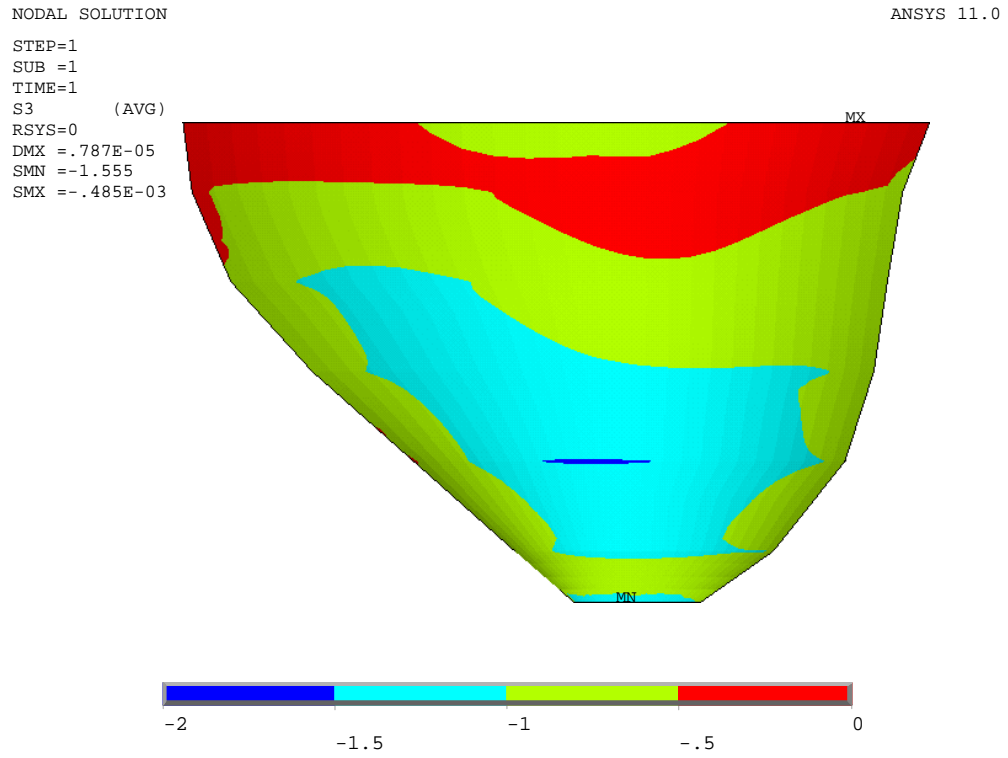


Figura 8 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

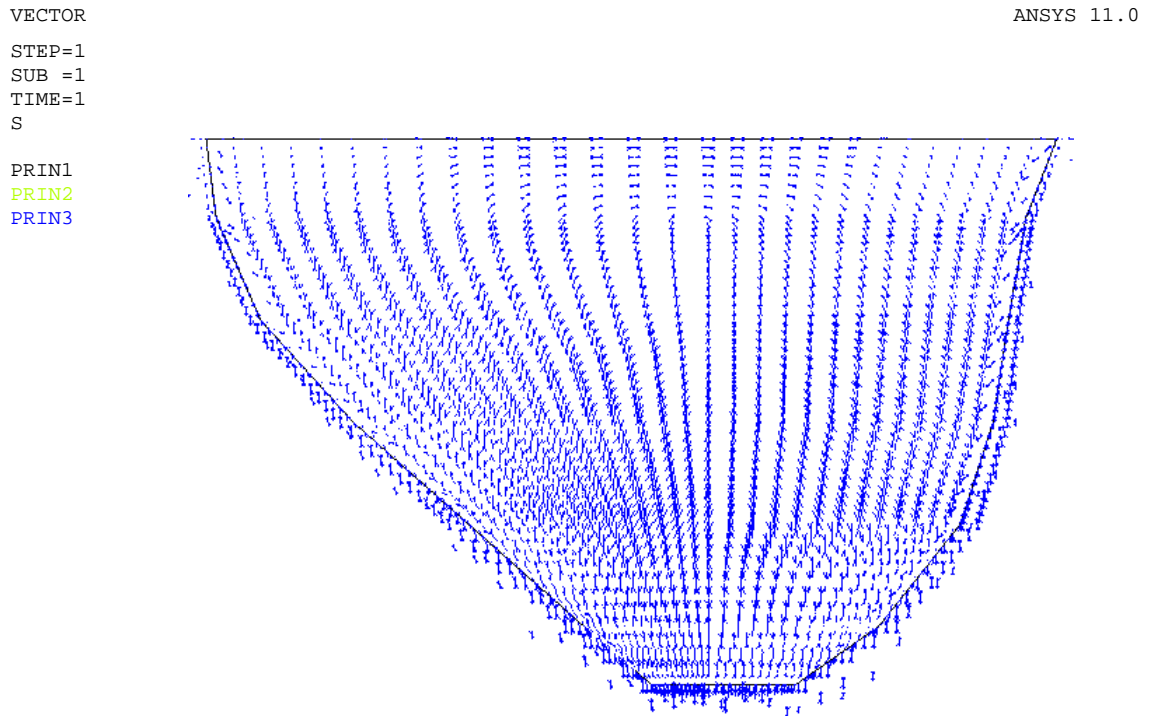


Figura 9 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.2. COMBINAÇÃO 2 (PP+PH)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =35.878
SMN =1.175
SMX =35.878

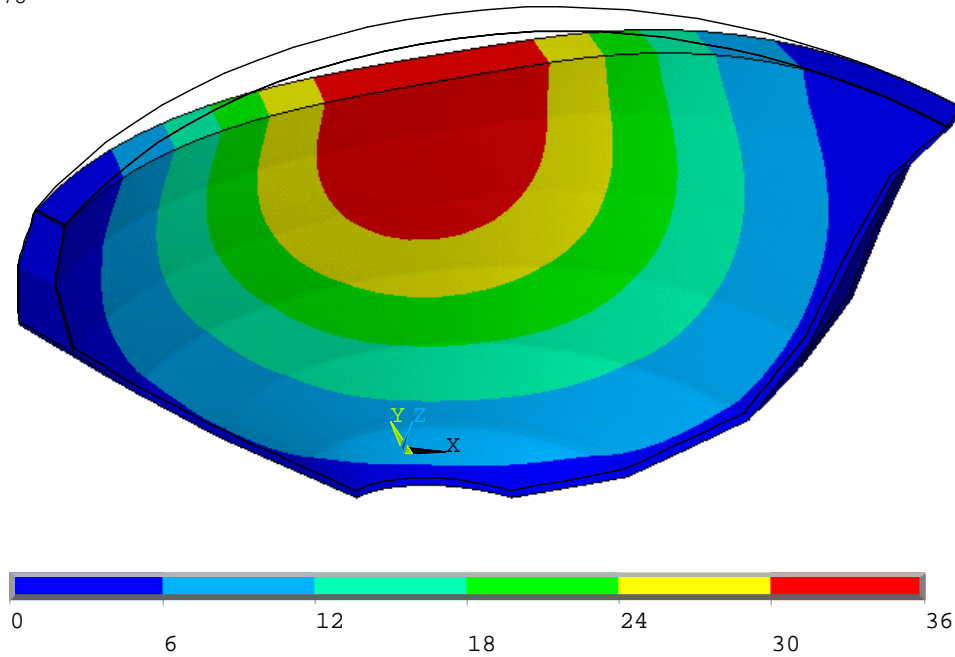


Figura 10 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =35.878
SMN =-35.351

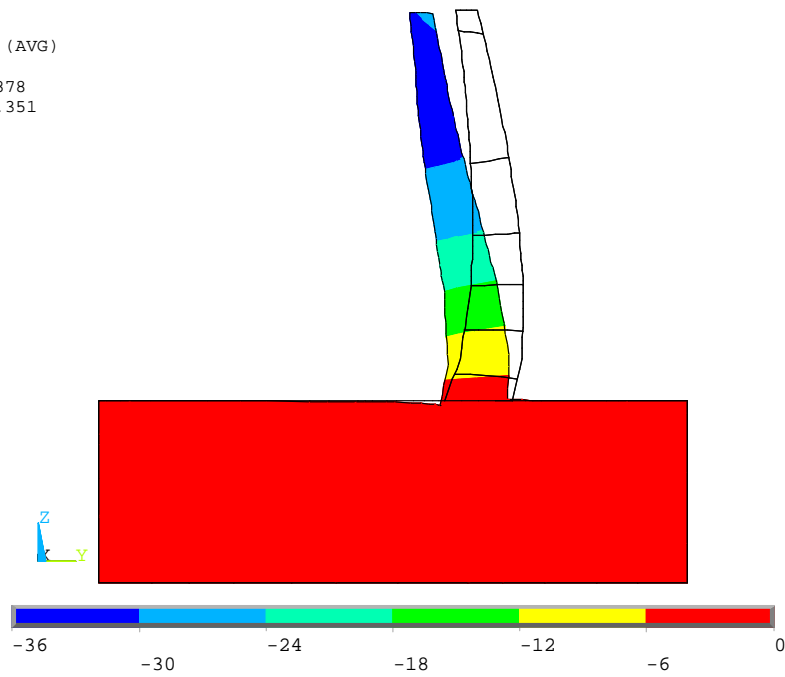


Figura 11 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =35.878
SMN =-4.163
SMX =2.831

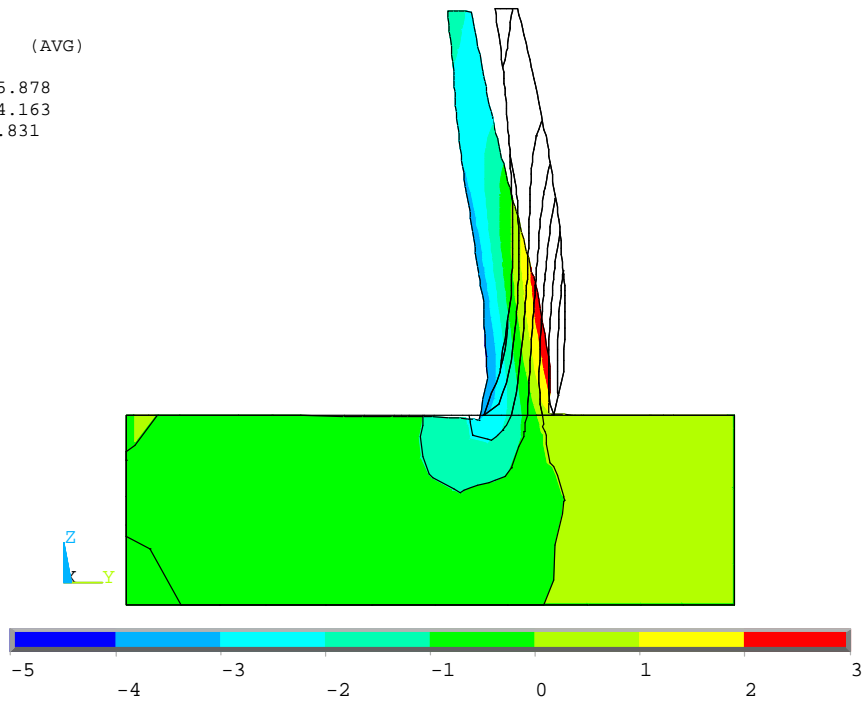


Figura 12 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

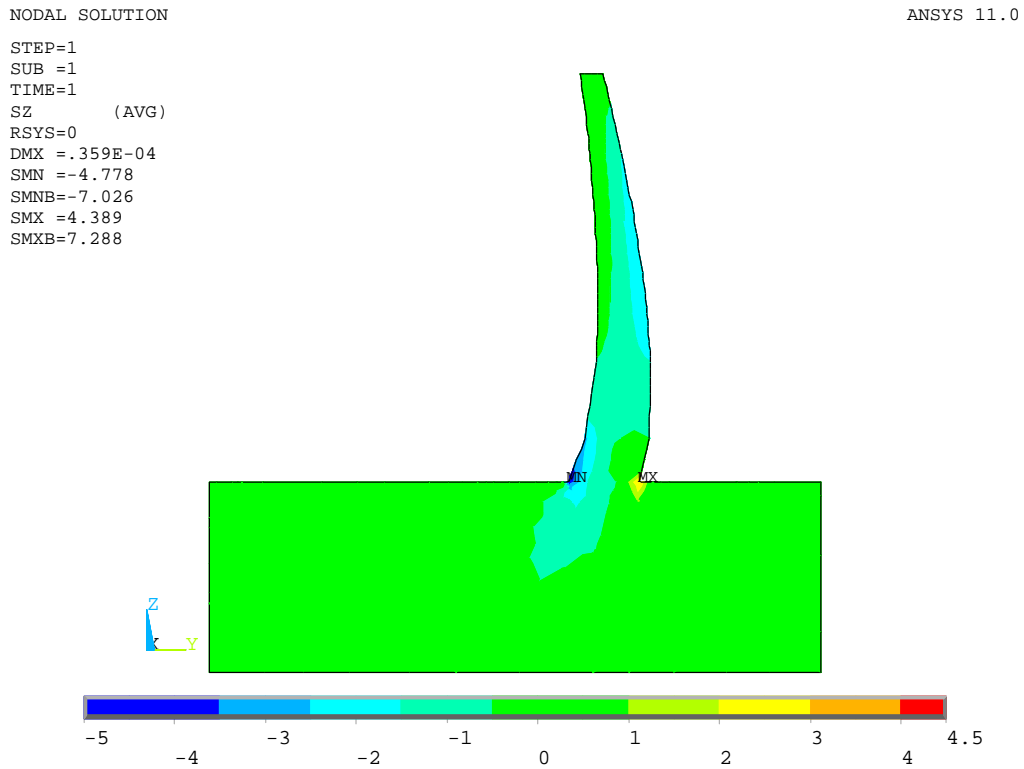


Figura 13 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

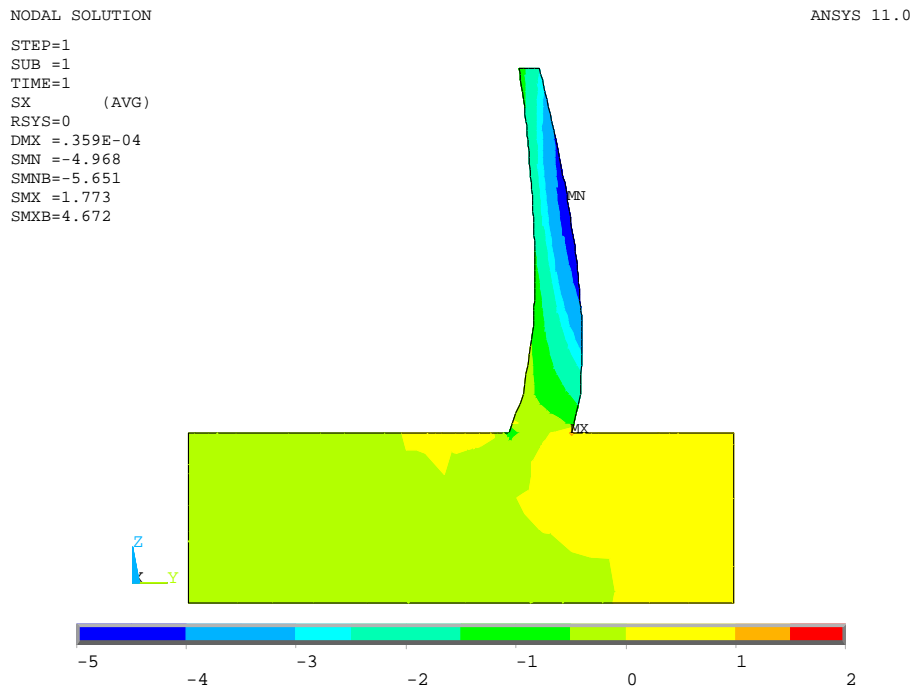


Figura 14 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

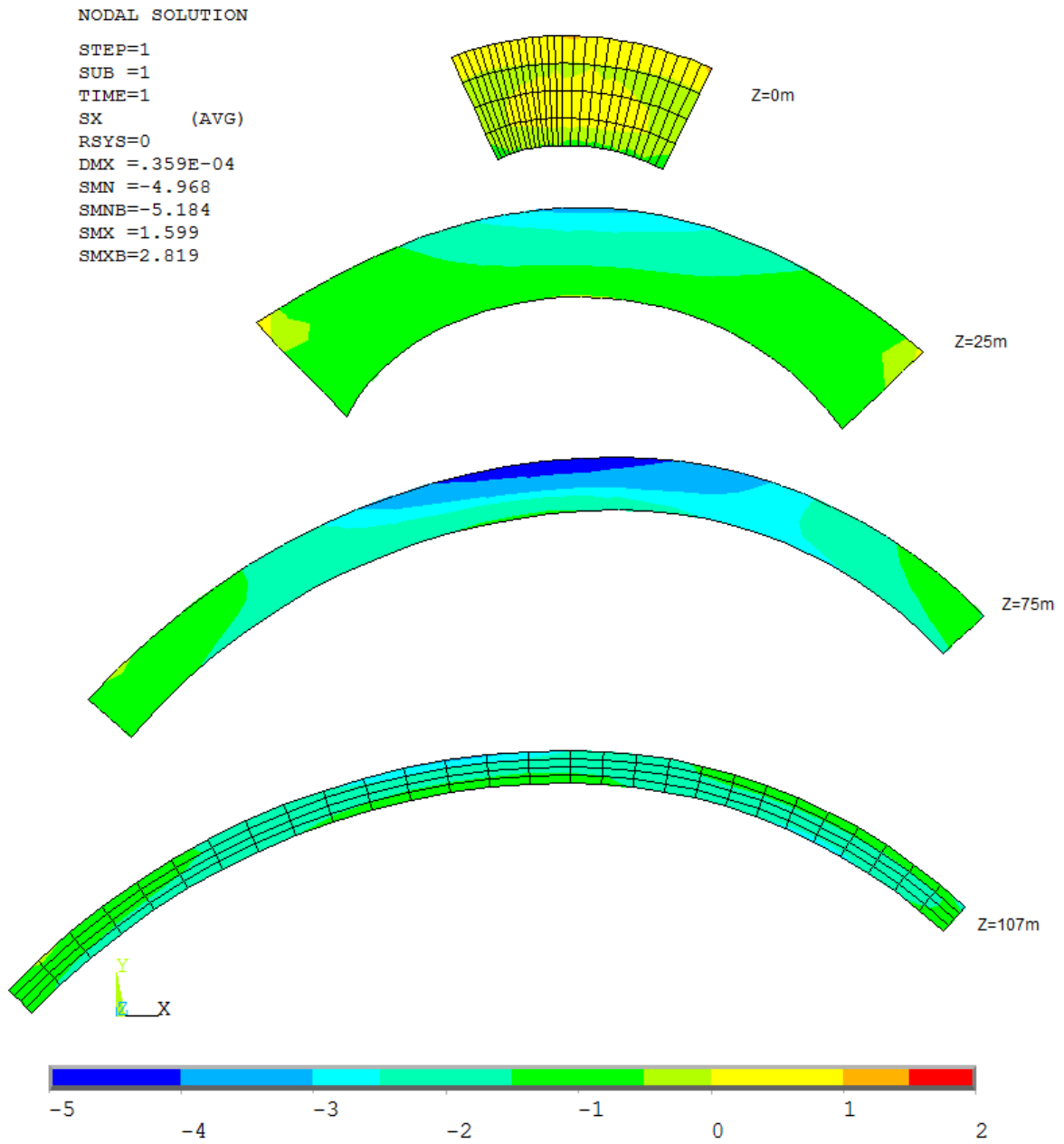


Figura 15 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX = .357E-04
SMN = -.89604
SMNB=-1.482
SMX = 7.143
SMXB=7.592

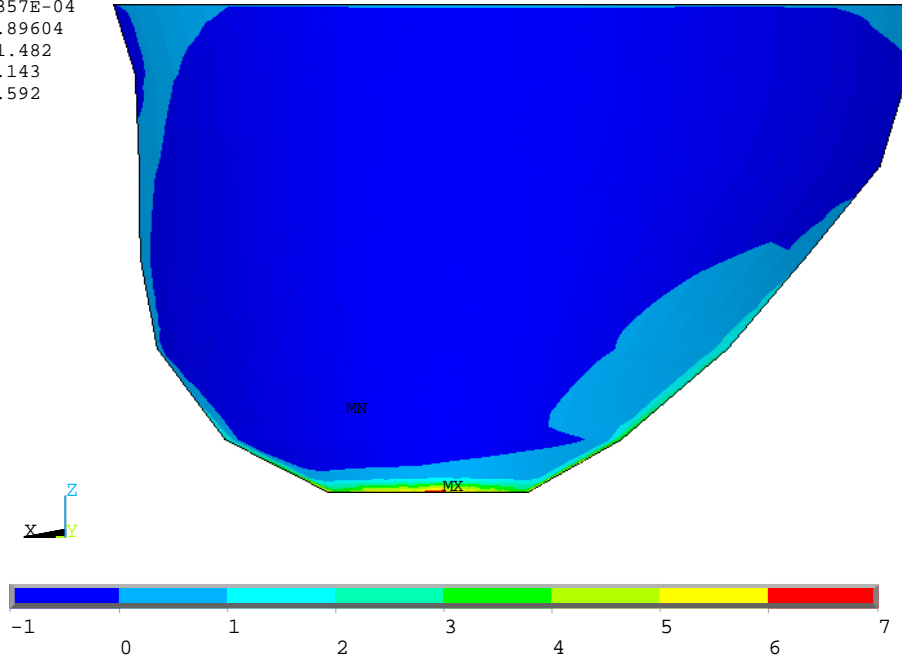


Figura 16 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

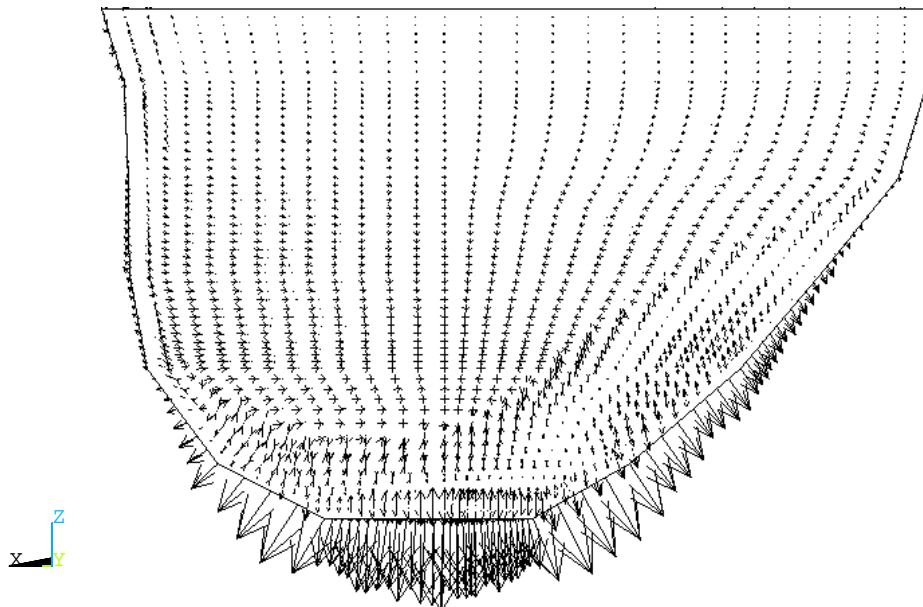


Figura 17 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.359E-04
SMN =-.898276
SMNB=-1.902
SMX =.857273
SMXB=1.48

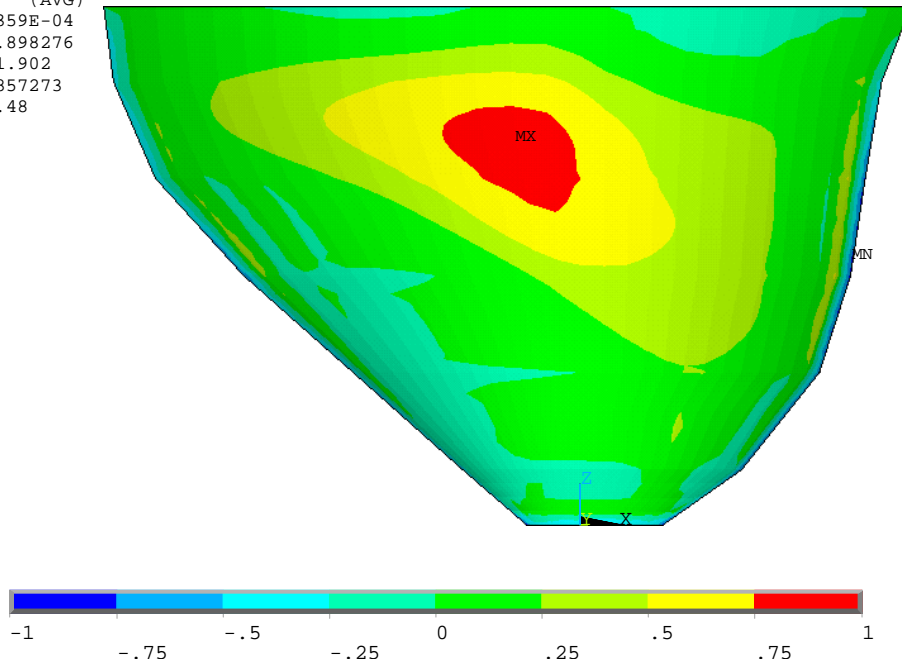


Figura 18 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

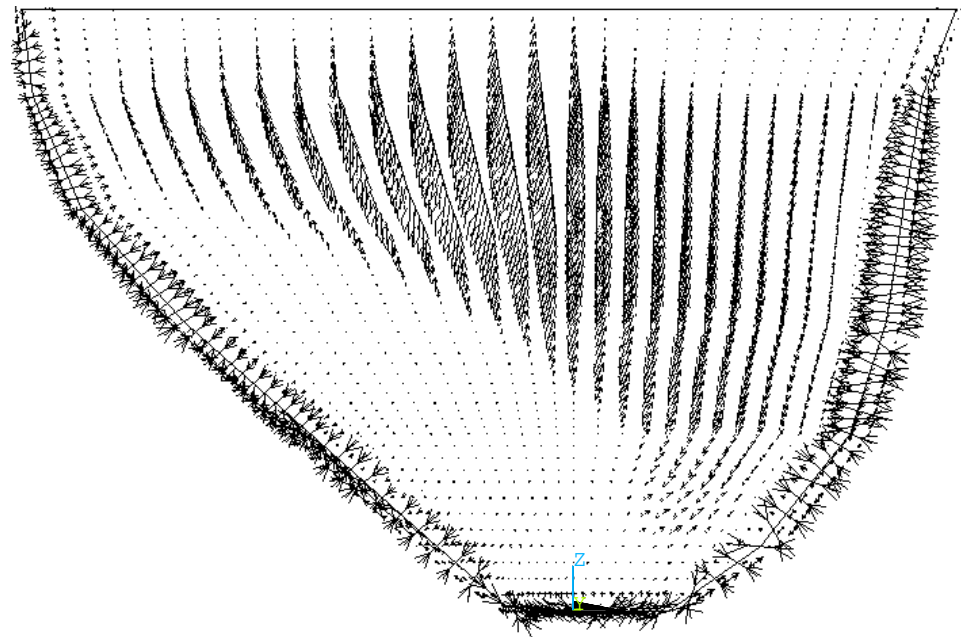


Figura 19 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX = .357E-04
SMN = -5.089
SMNB = -5.976
SMX = .50041
SMXB = 1.768

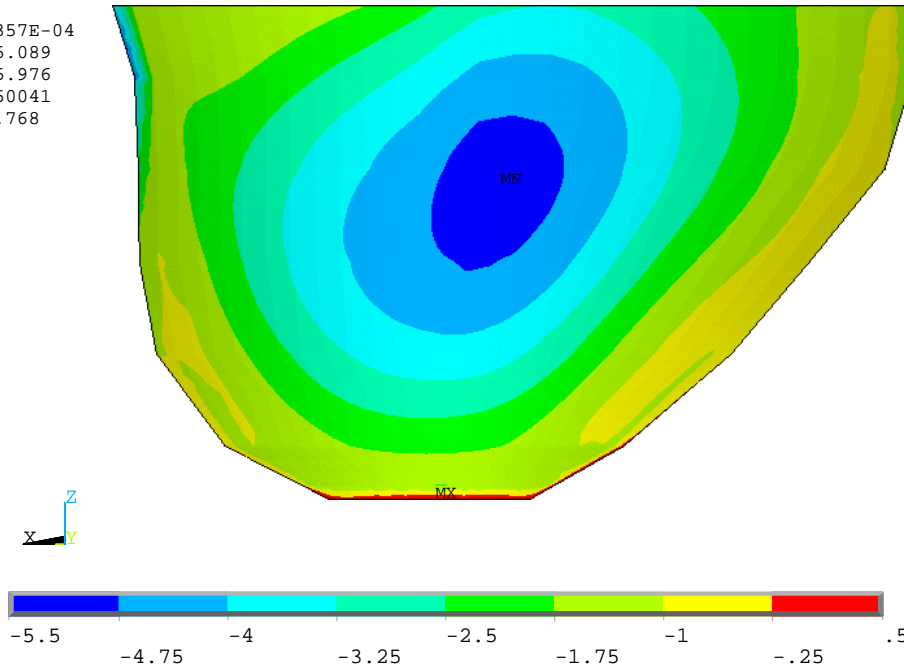


Figura 20 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

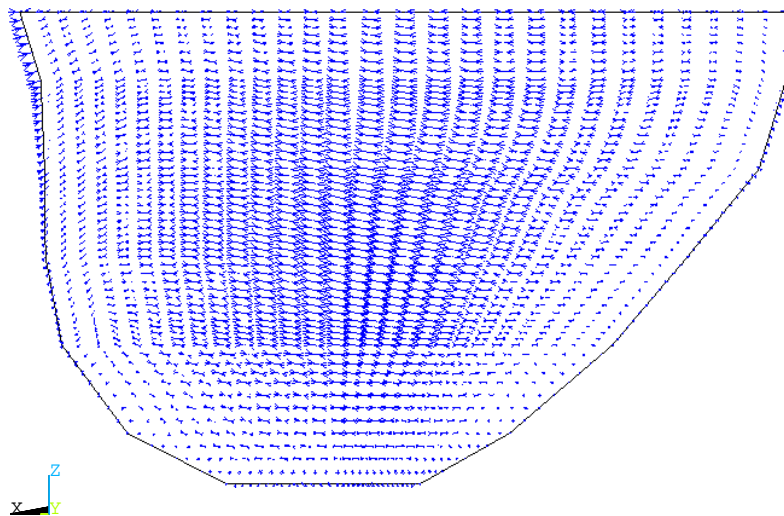


Figura 21 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

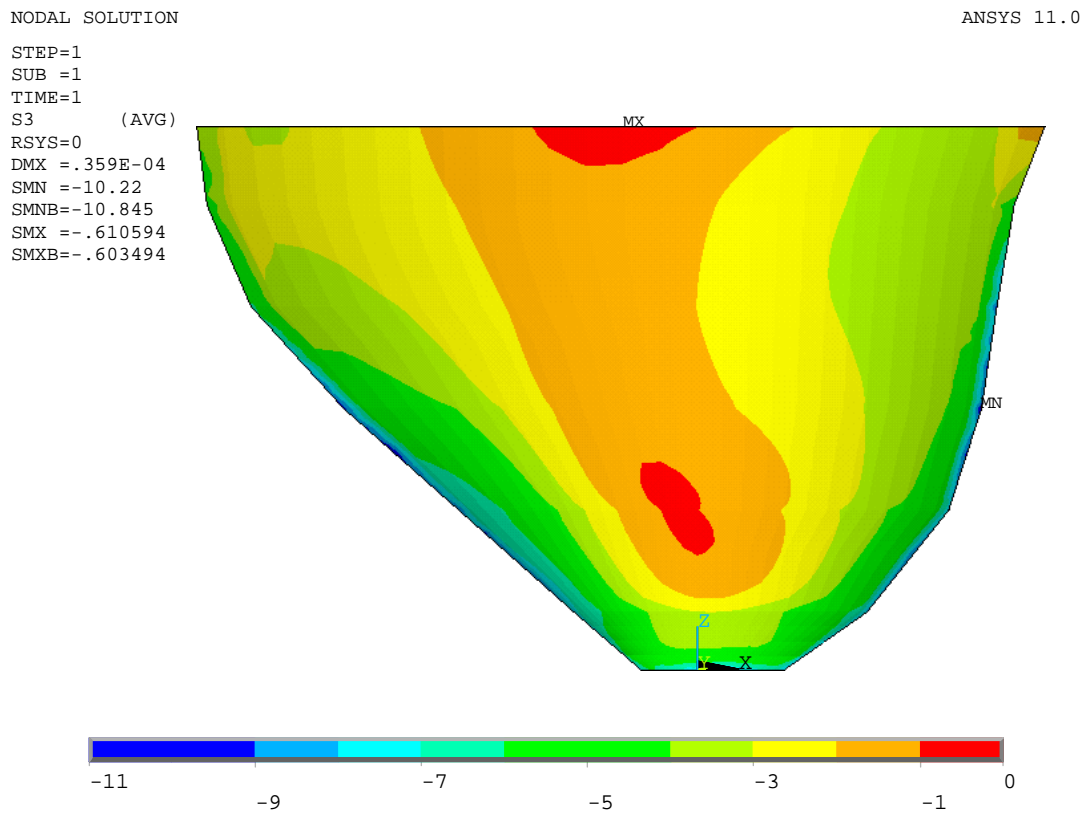


Figura 22 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

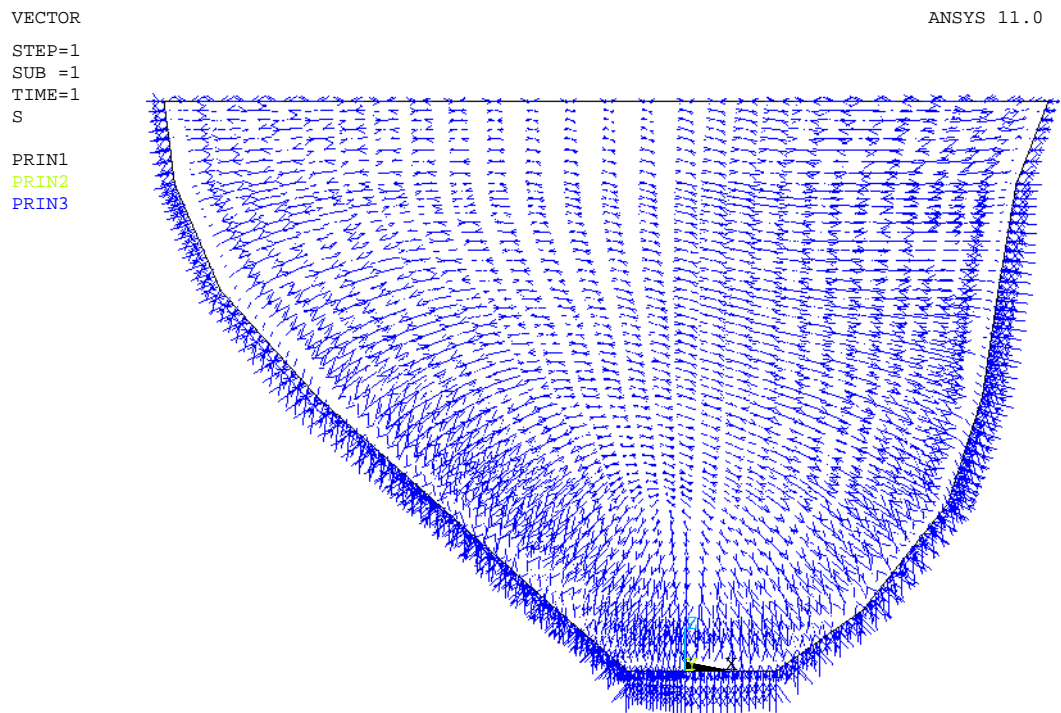


Figura 23 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.3. COMBINAÇÃO 3 (PP+PH+V-)

A2.3.1. CASO 1

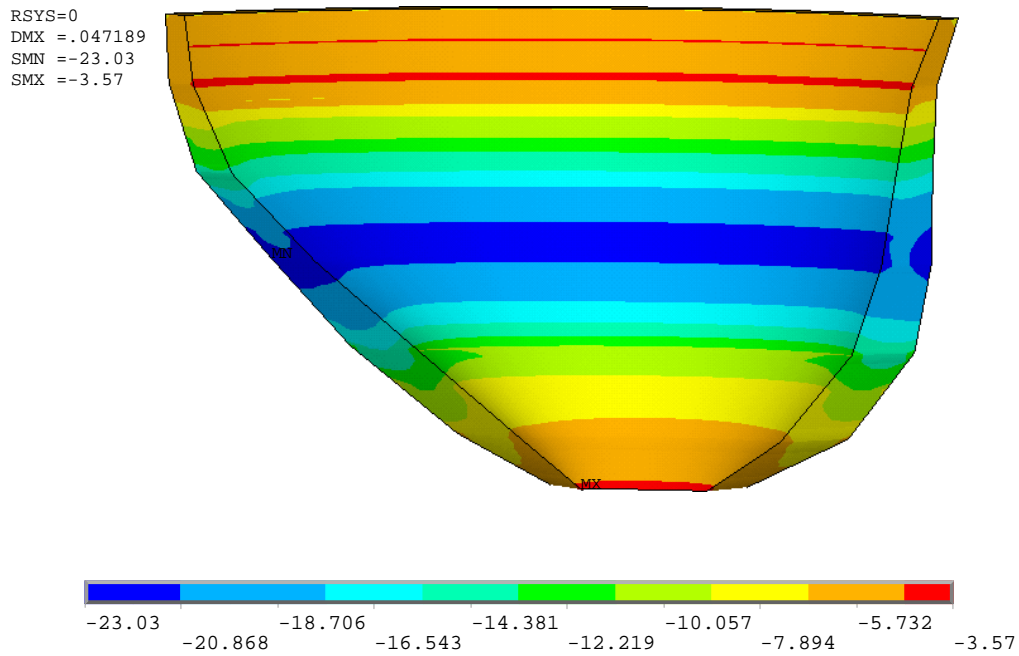


Figura 24 – Temperaturas no corpo da barragem (°C)

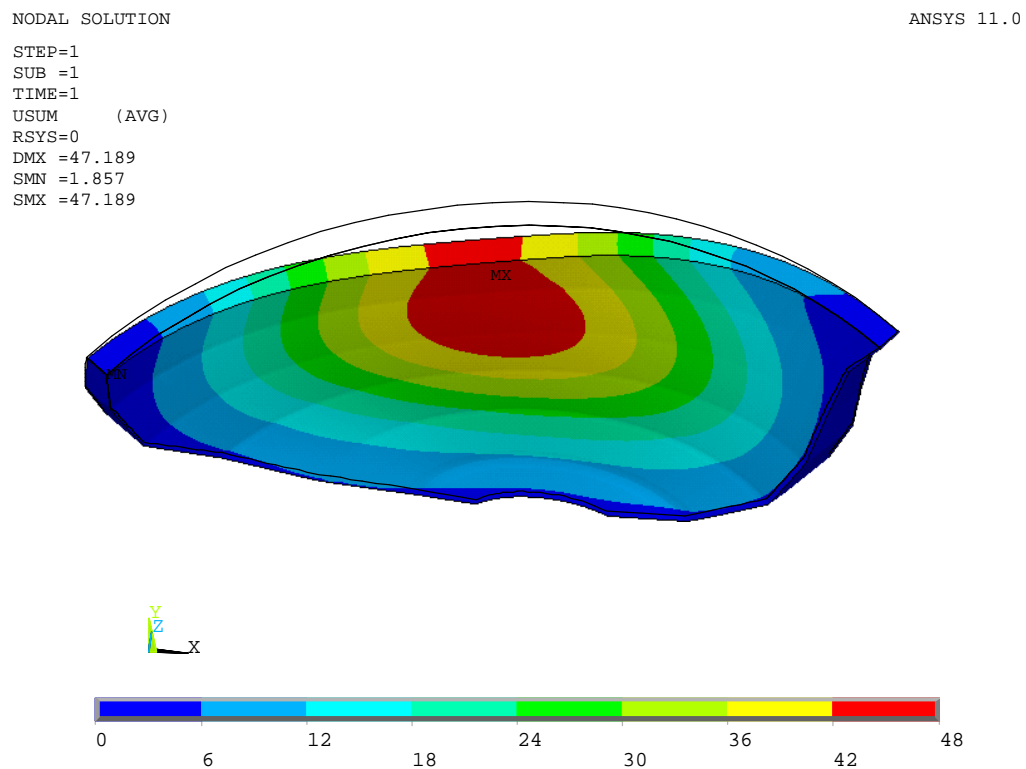


Figura 25 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =47.189
SMN =-46.287
SMX =.945376

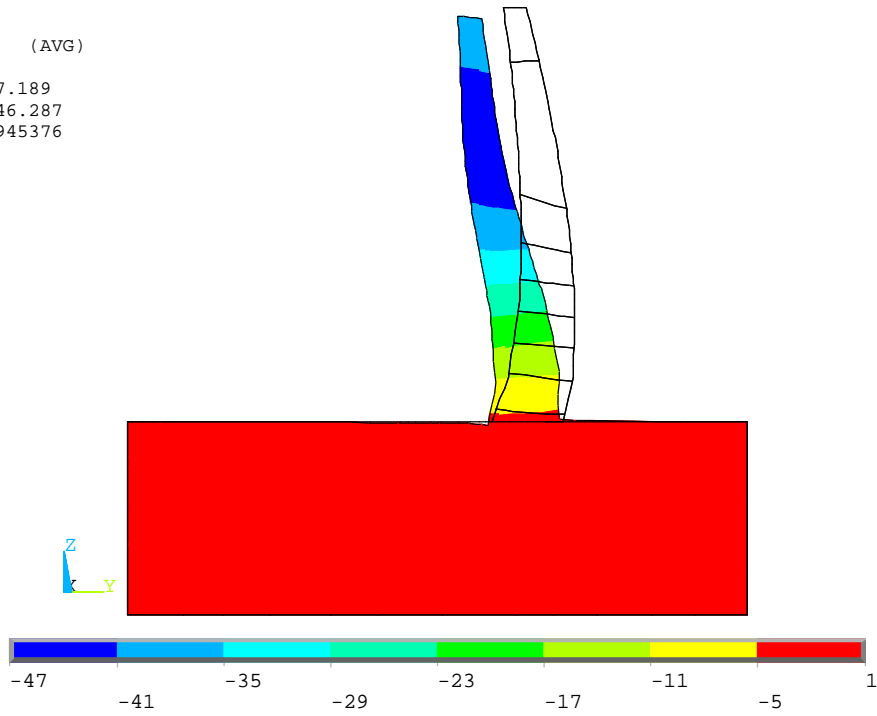


Figura 26 – Deslocamentos segundo a direção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =47.189
SMN =-9.902
SMX =5.443

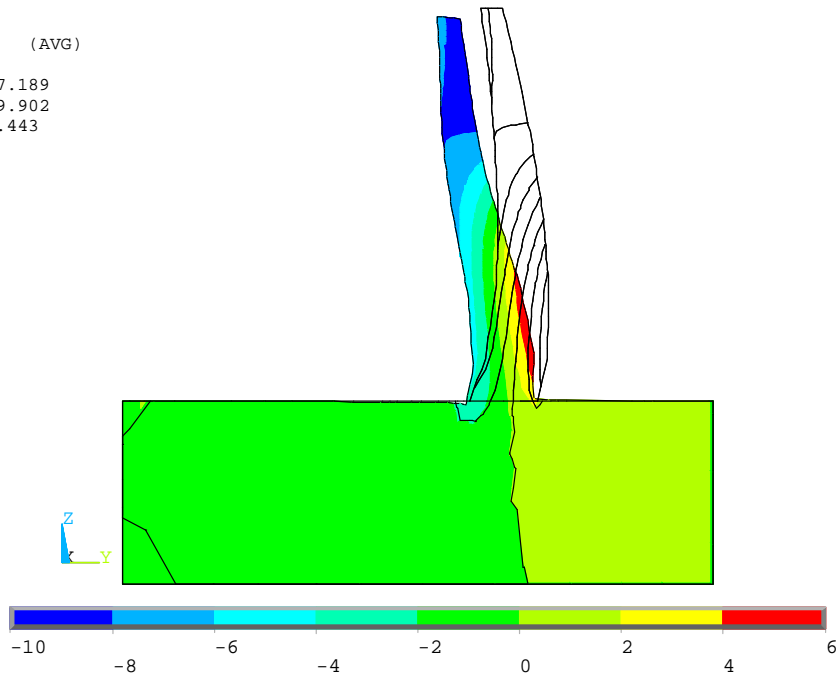


Figura 27 – Deslocamentos segundo a direção z (mm)

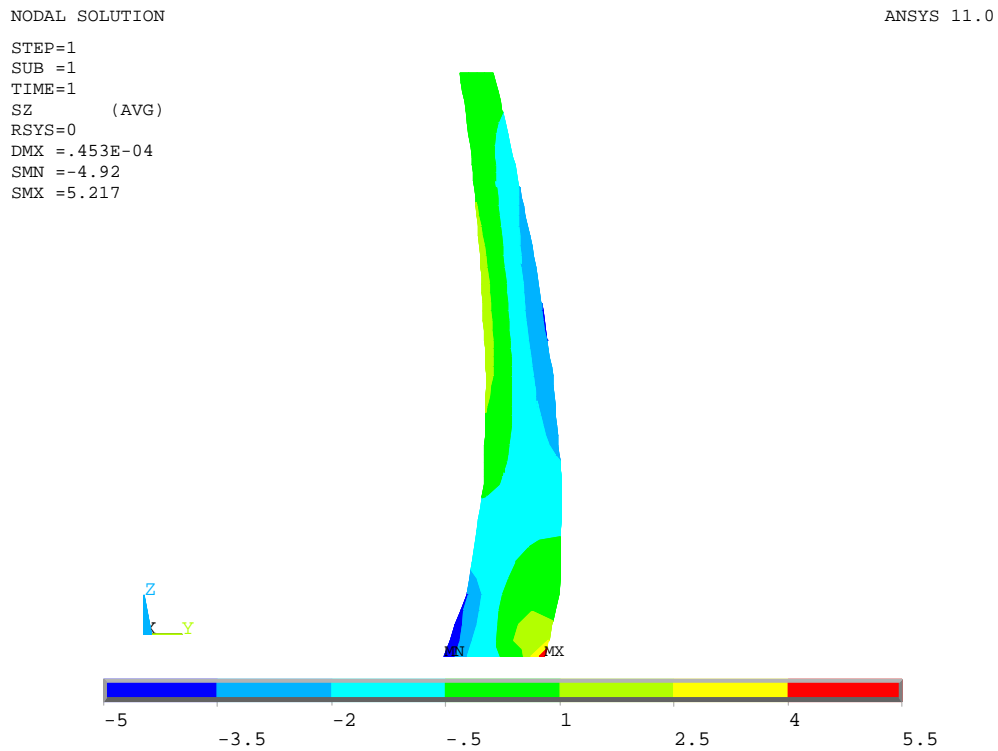


Figura 28 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

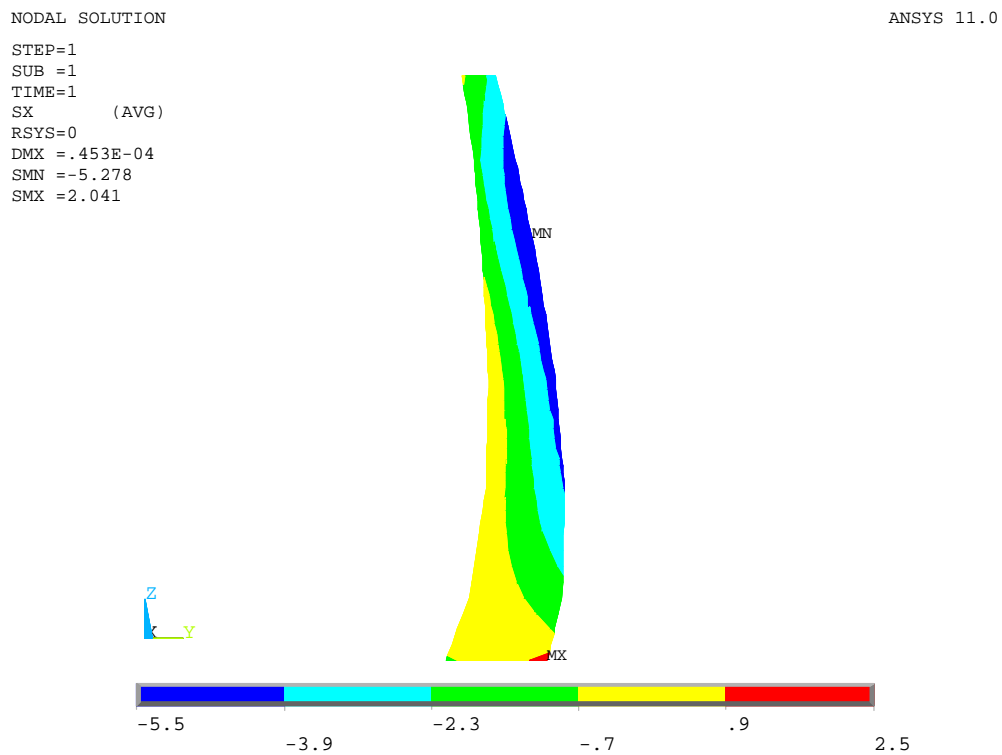


Figura 29 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

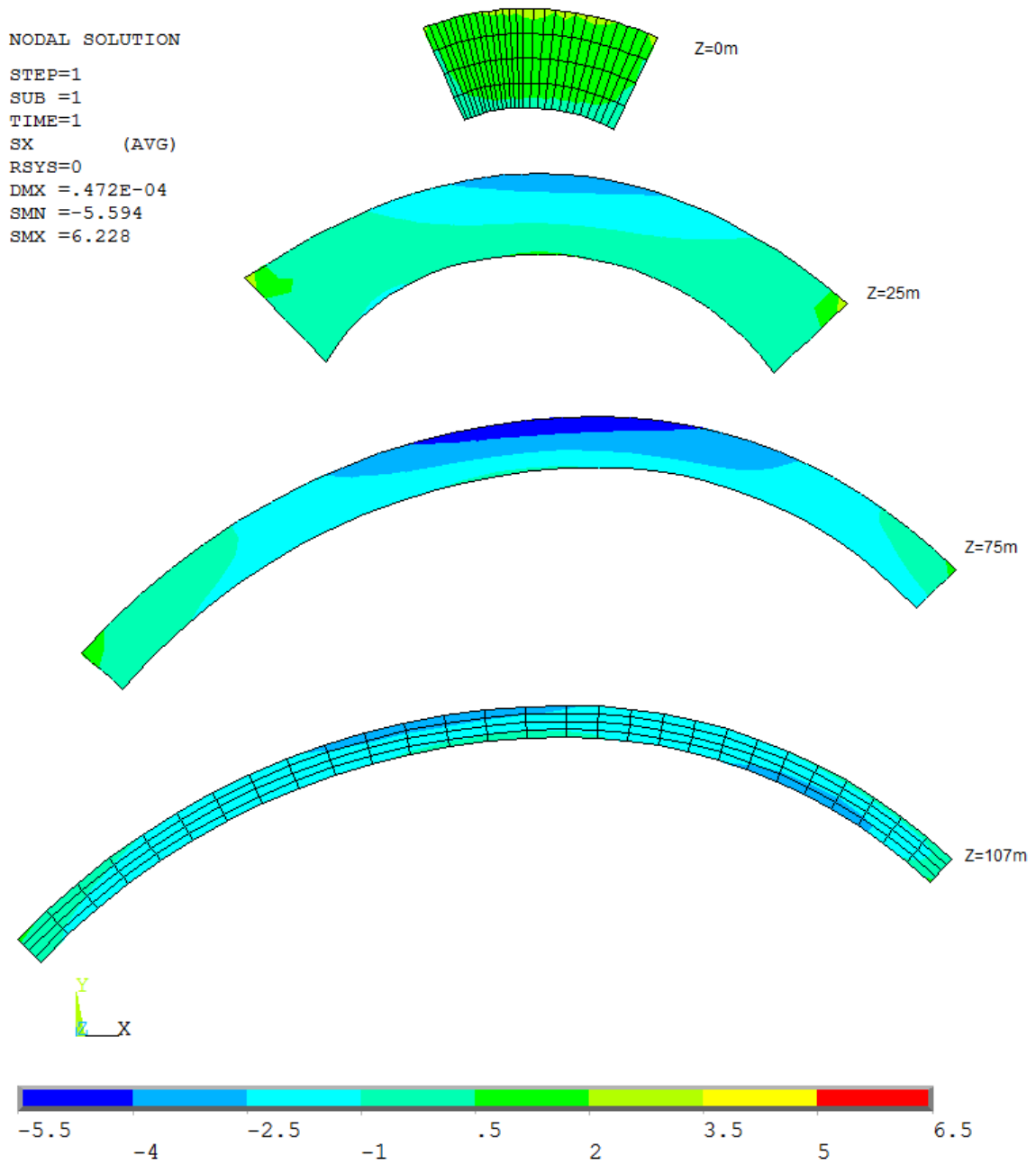


Figura 30 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.472E-04
SMN =-.836354
SMX =12.576

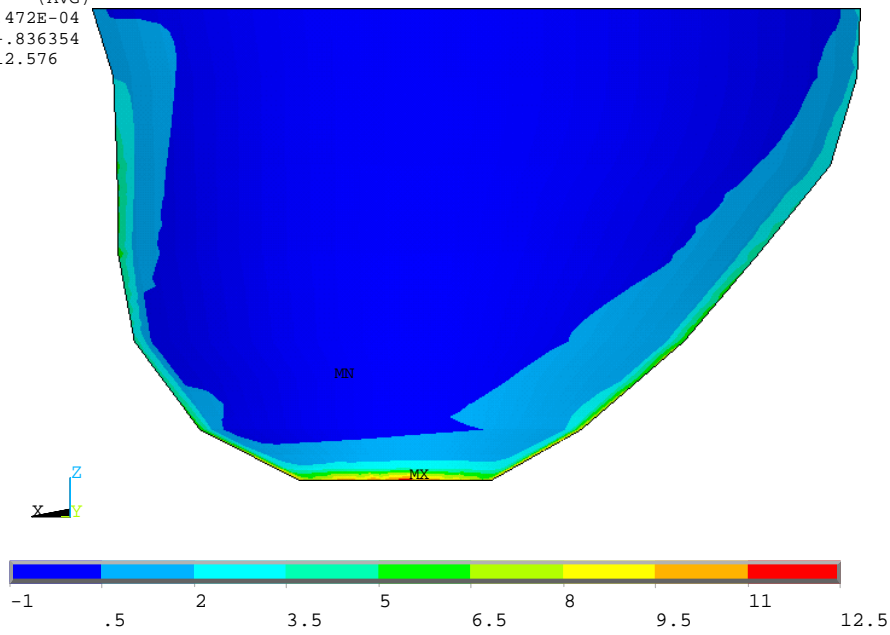


Figura 31 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

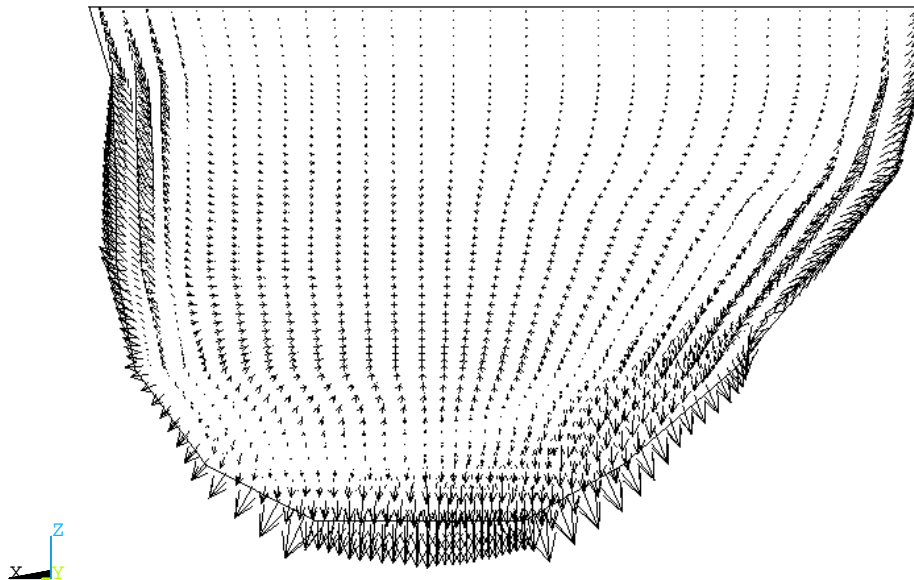


Figura 32 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

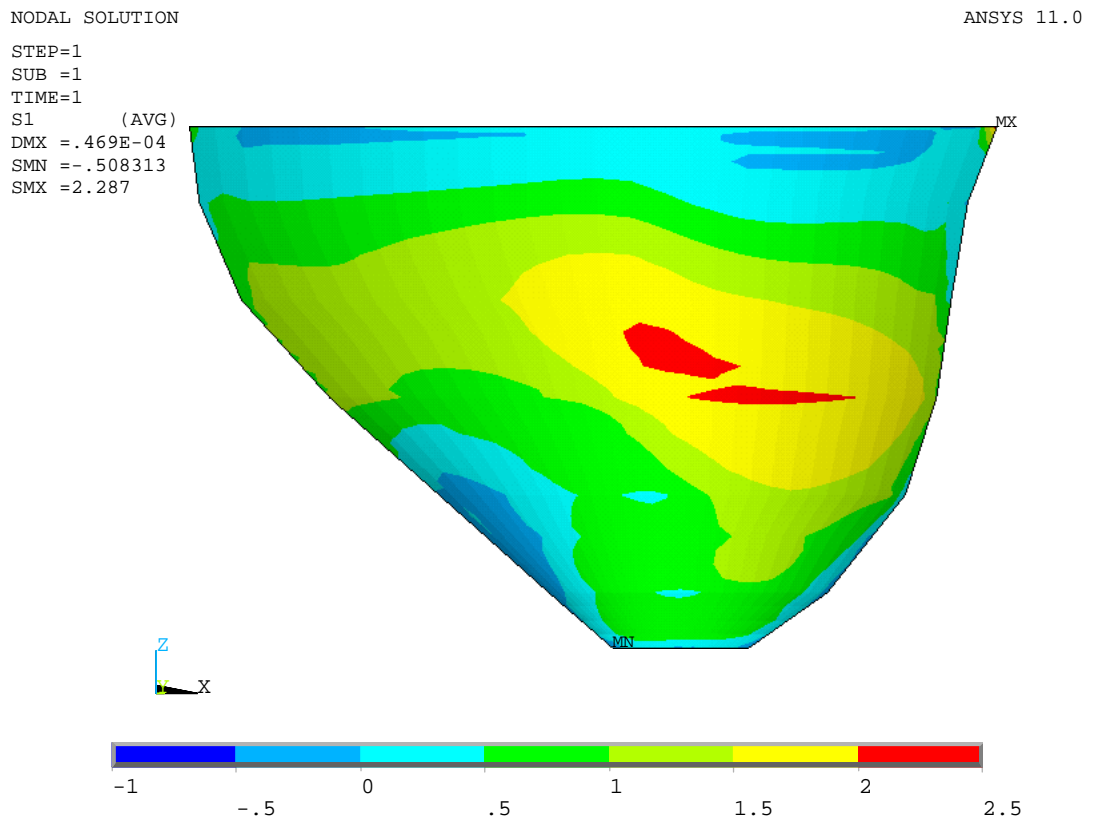


Figura 33 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

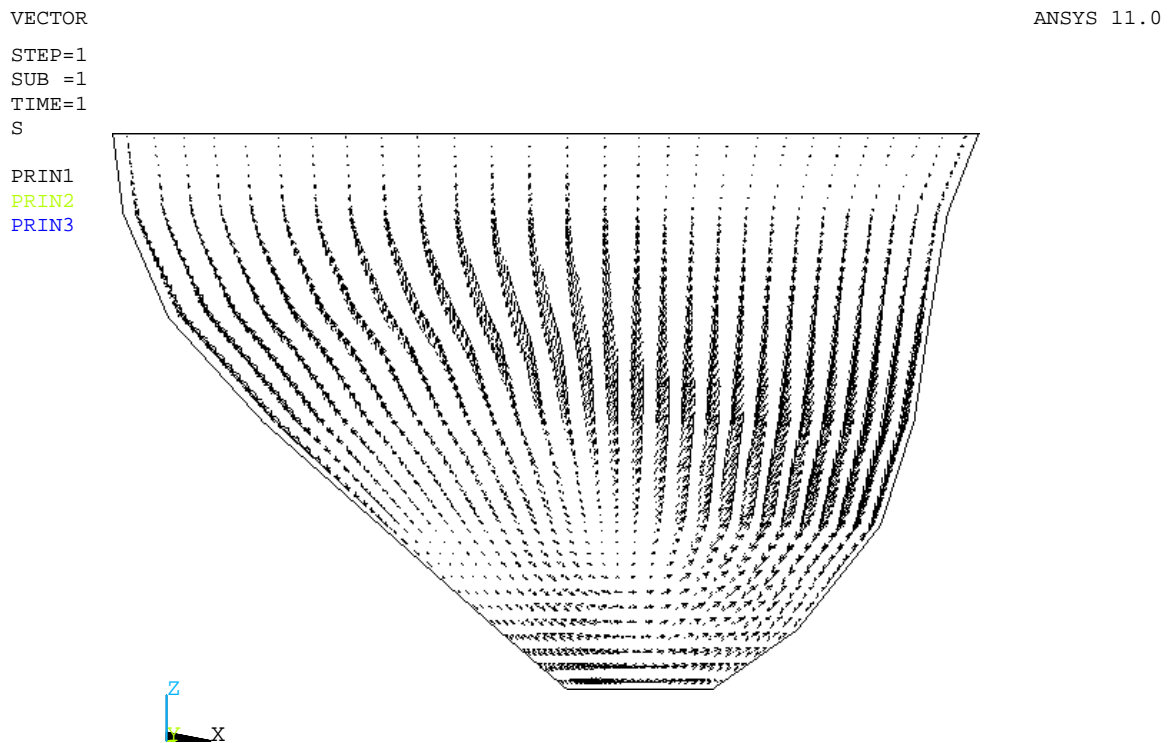


Figura 34 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX =.472E-04
SMN =-5.701
SMX =1.582

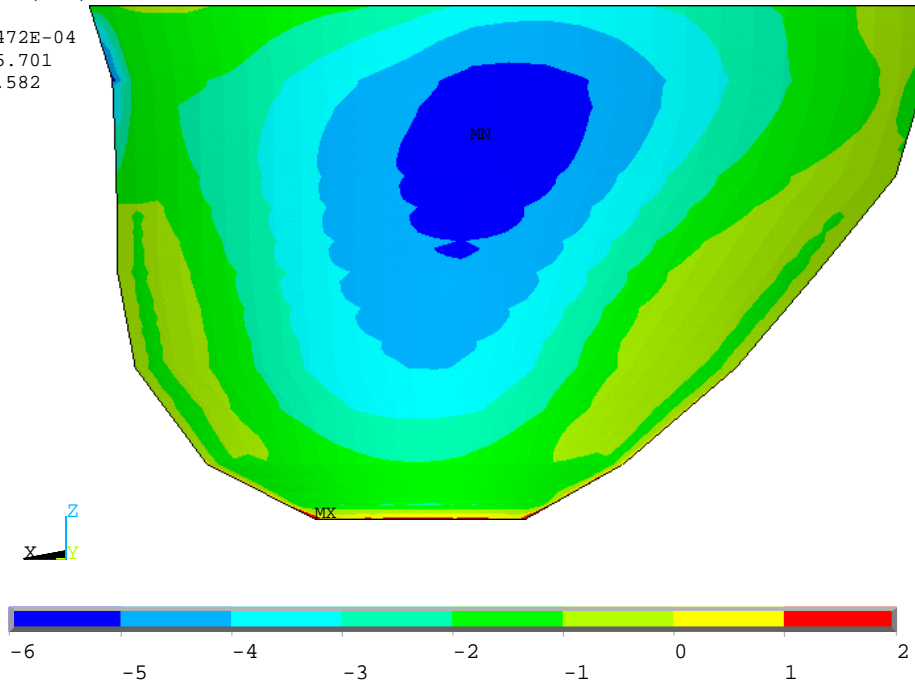


Figura 35 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

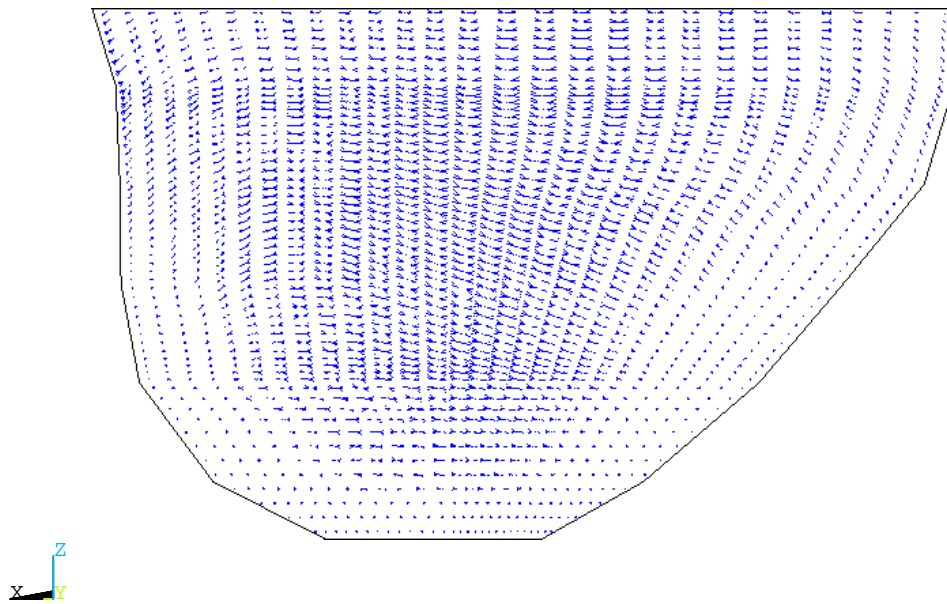


Figura 36 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

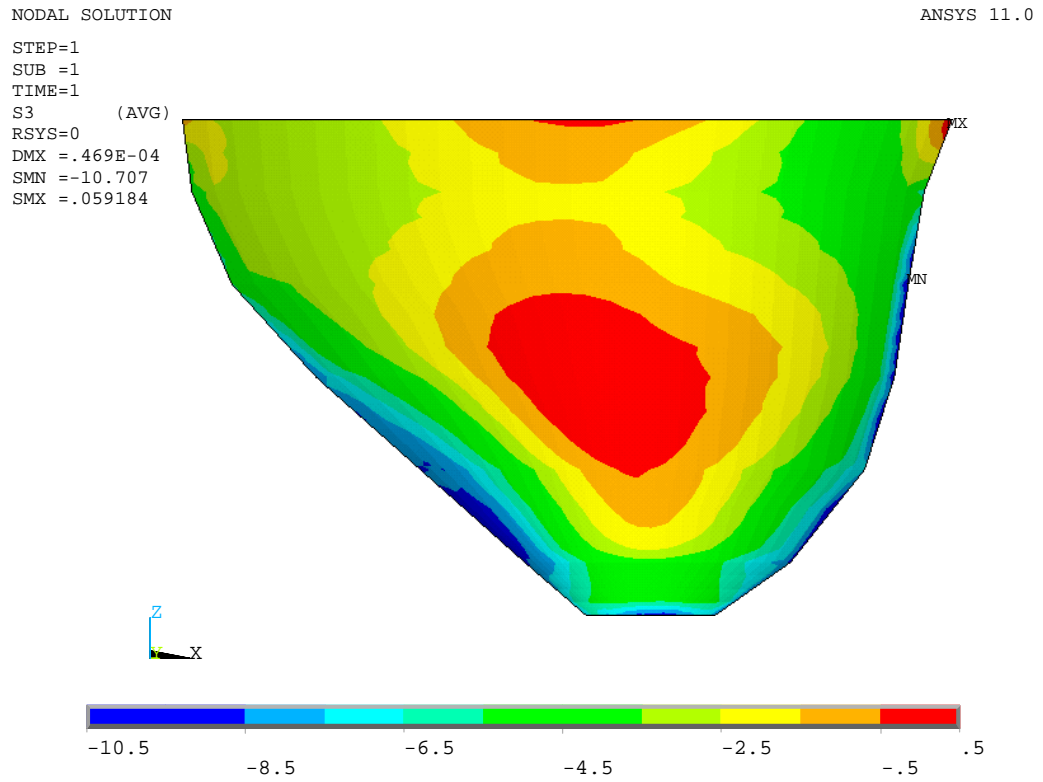


Figura 37 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

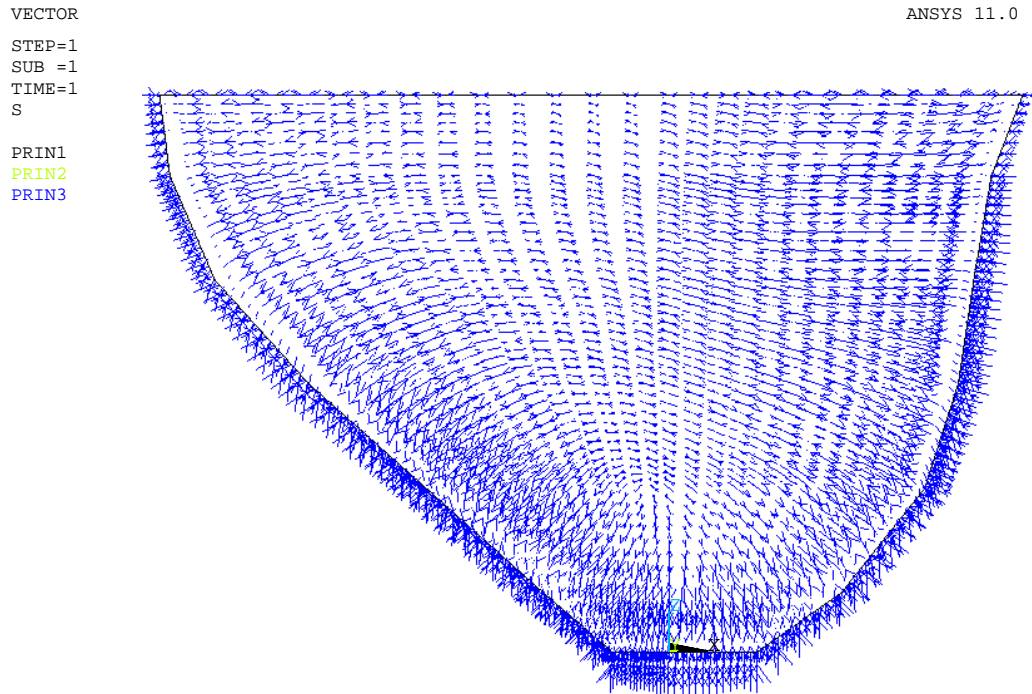


Figura 38 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.3.2. CASO 2 A)

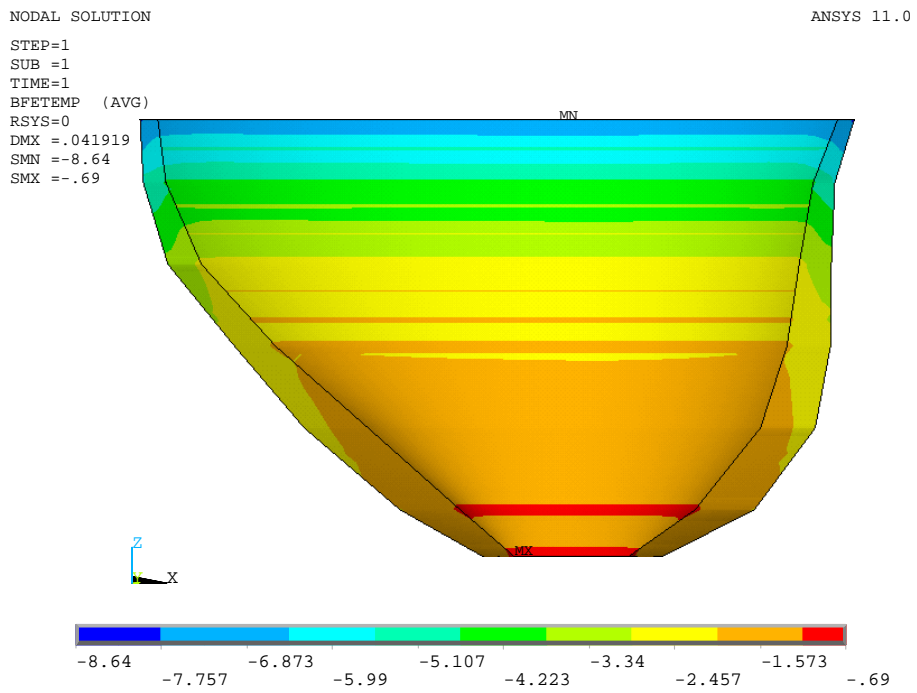


Figura 39 – Temperaturas no corpo da barragem (°C)

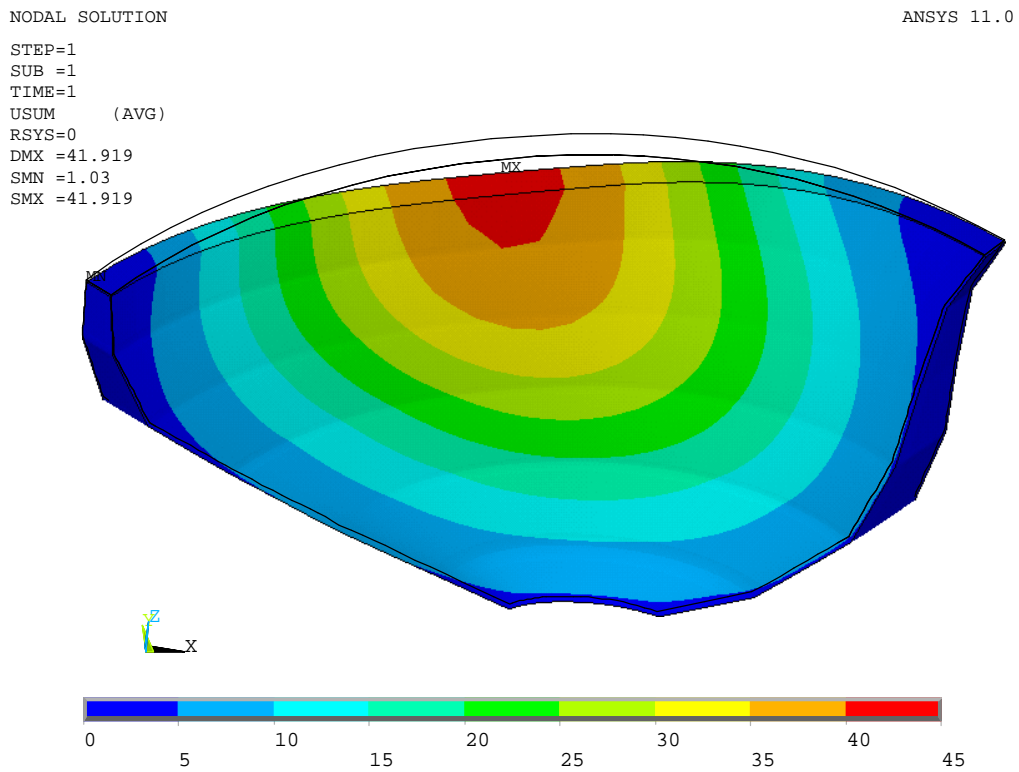


Figura 40 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =41.919
SMN =-41.193

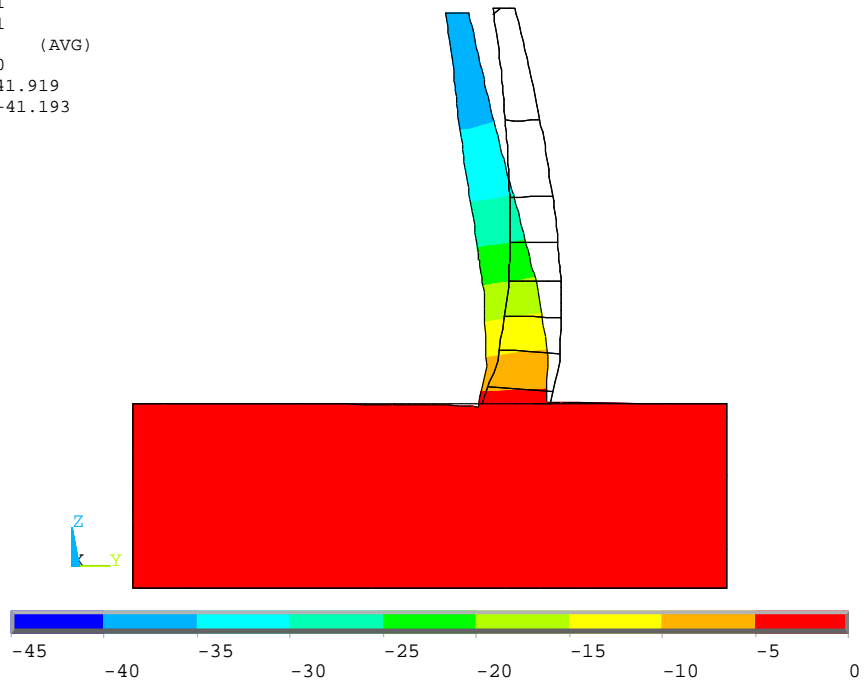


Figura 41 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =41.919
SMN =-4.761
SMX =3.244

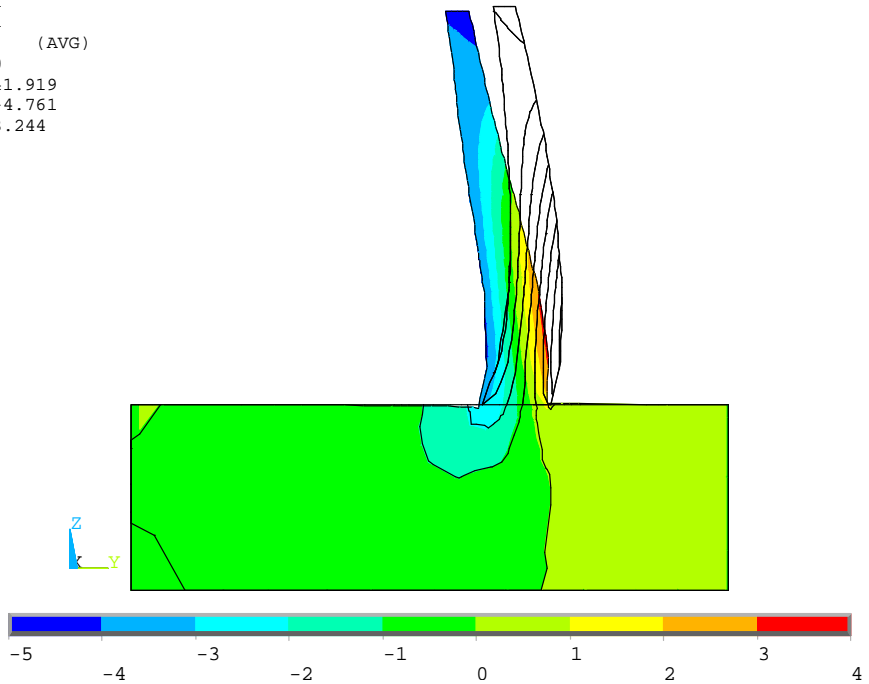


Figura 42 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.361E-04
SMN =-4.336
SMX =3.268

ANSYS 11.0

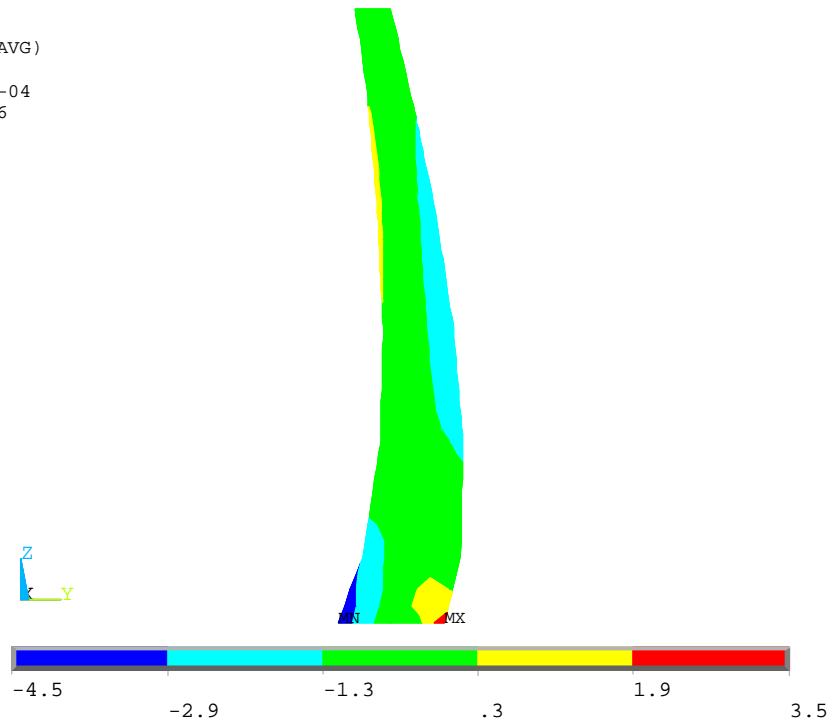


Figura 43 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.361E-04
SMN =-4.835
SMX =1.33

ANSYS 11.0

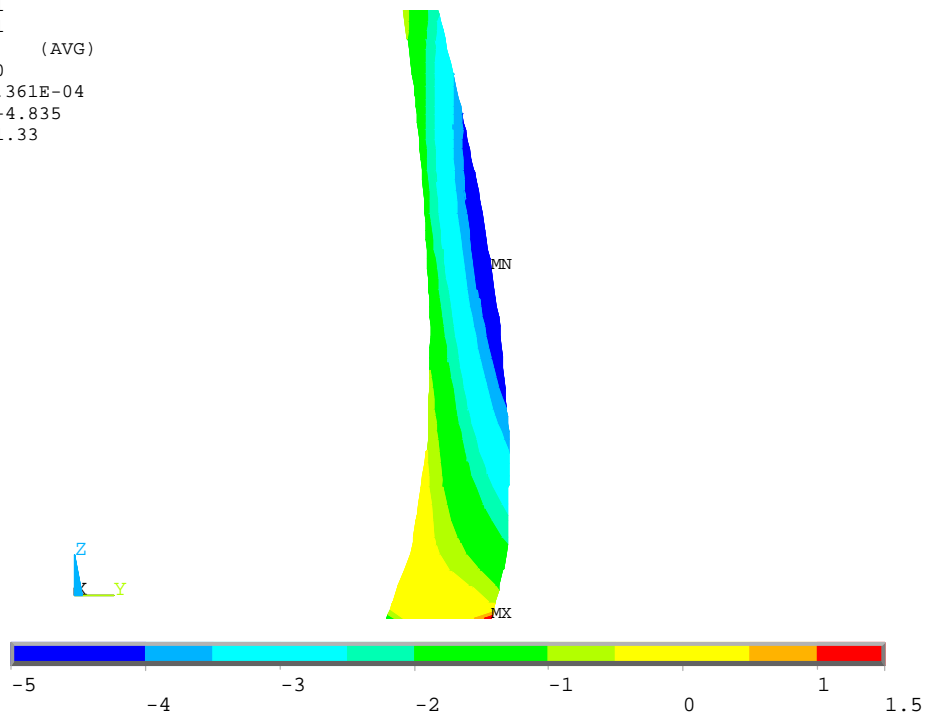


Figura 44 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

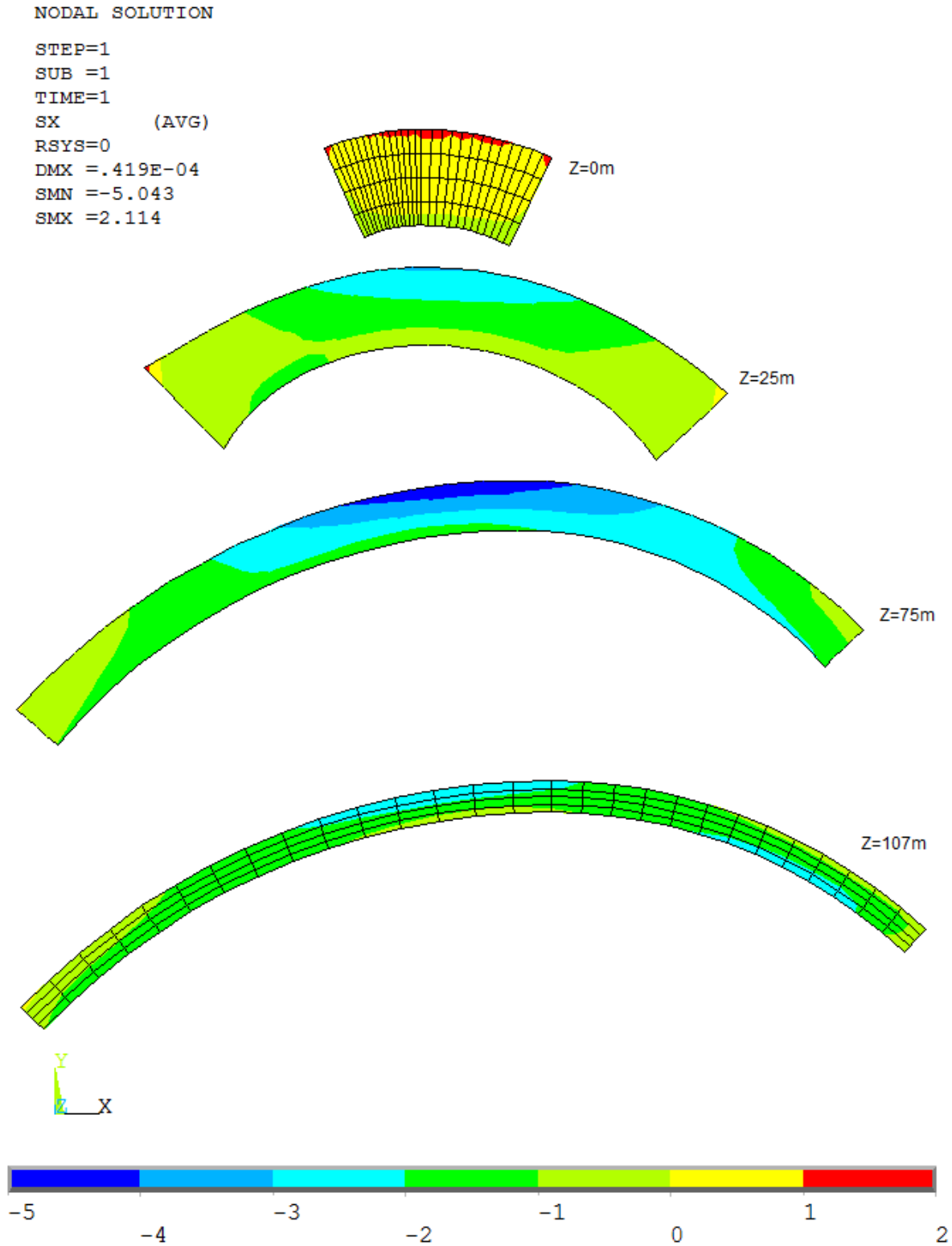


Figura 45 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.419E-04
SMN =-.872506
SMX =8.282

ANSYS 11.0

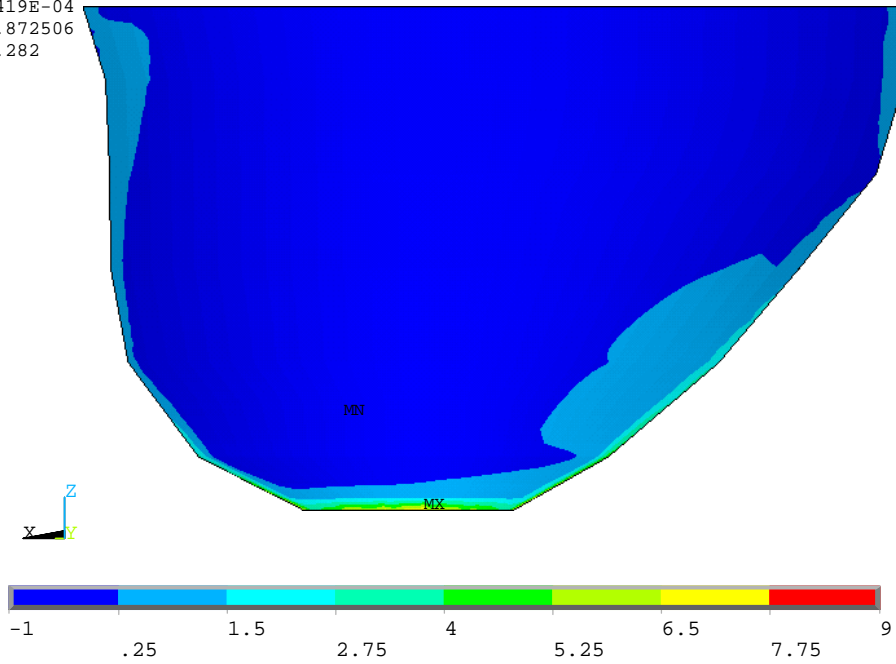


Figura 46 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR
STEP=1
SUB =1
TIME=1
S
PRIN1
PRIN2
PRIN3

ANSYS 11.0

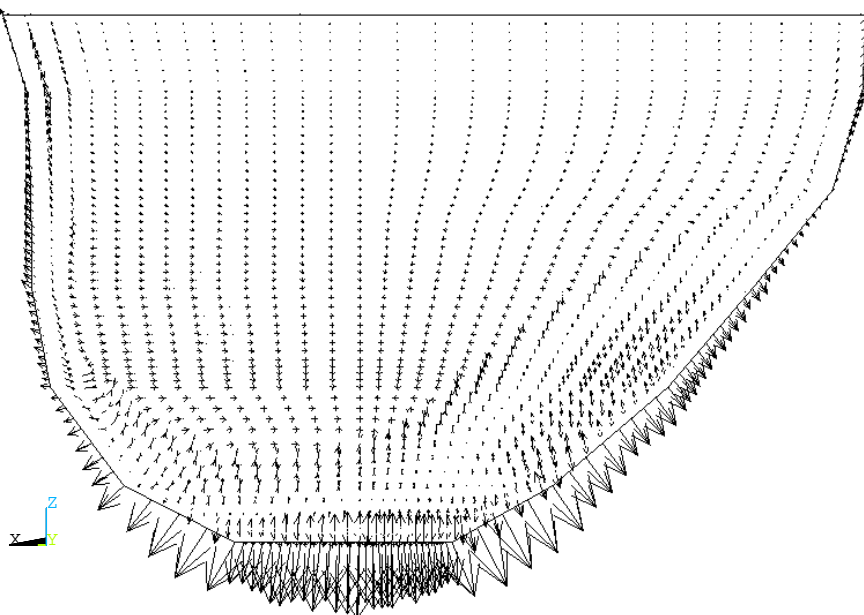


Figura 47 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

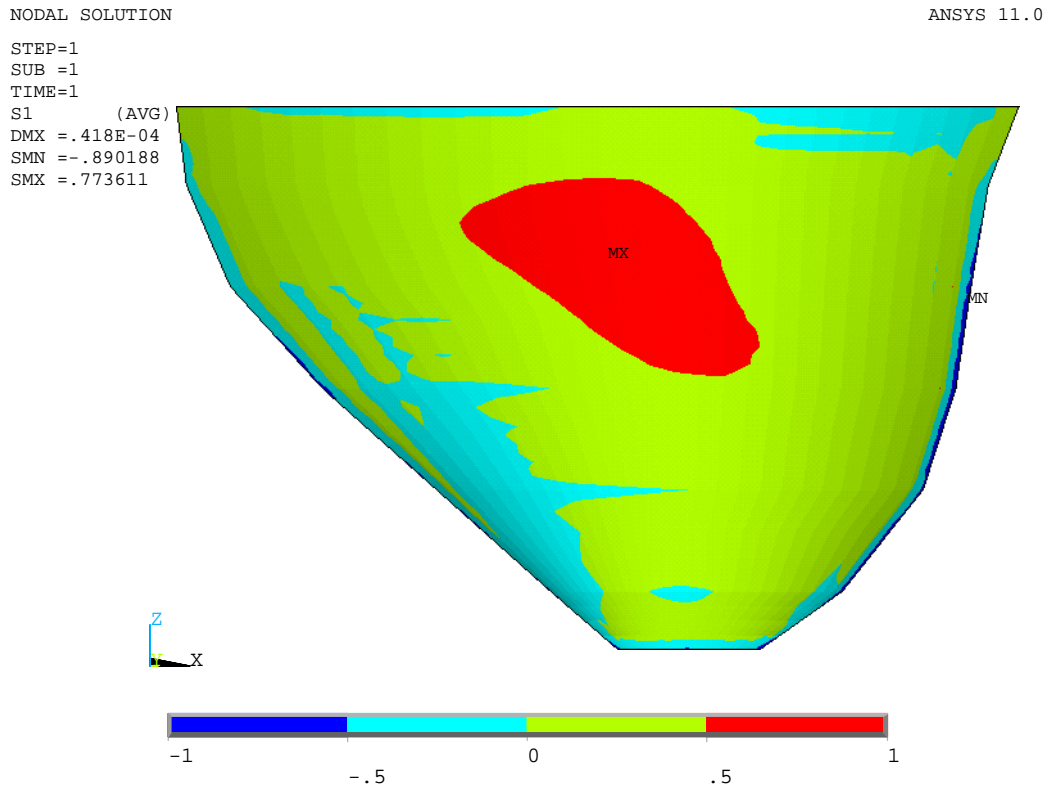


Figura 48 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

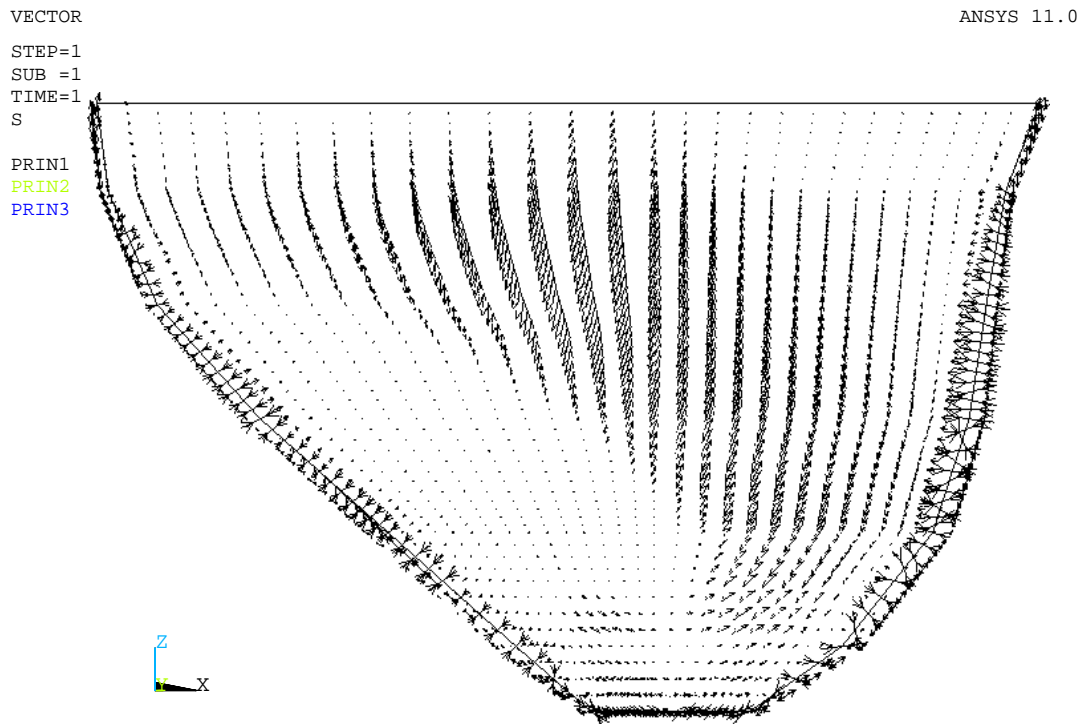


Figura 49 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

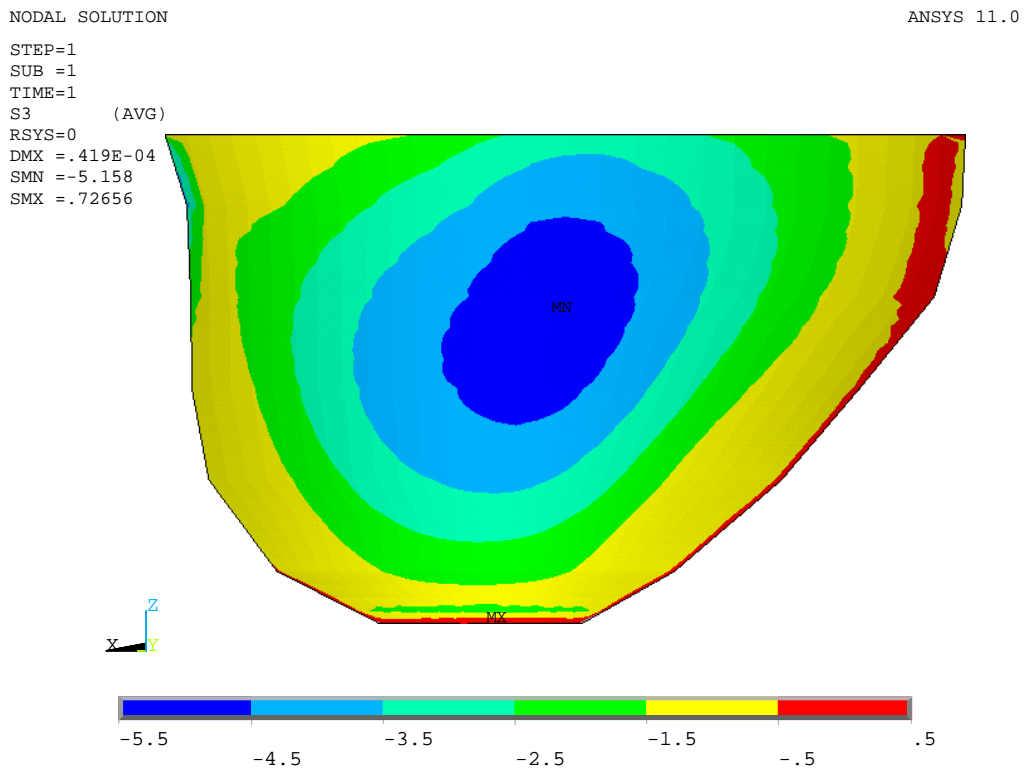


Figura 50 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

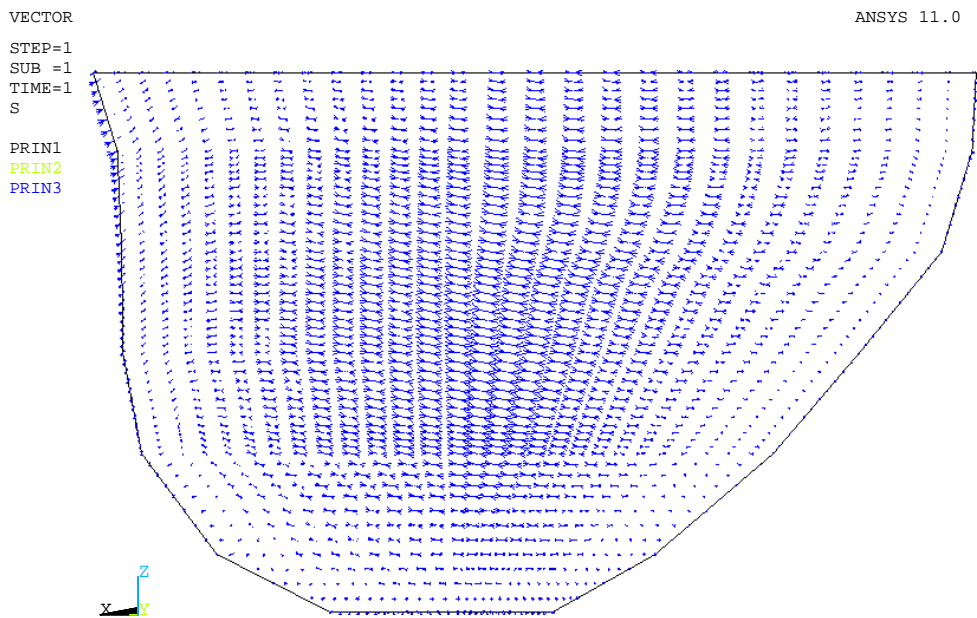


Figura 51 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

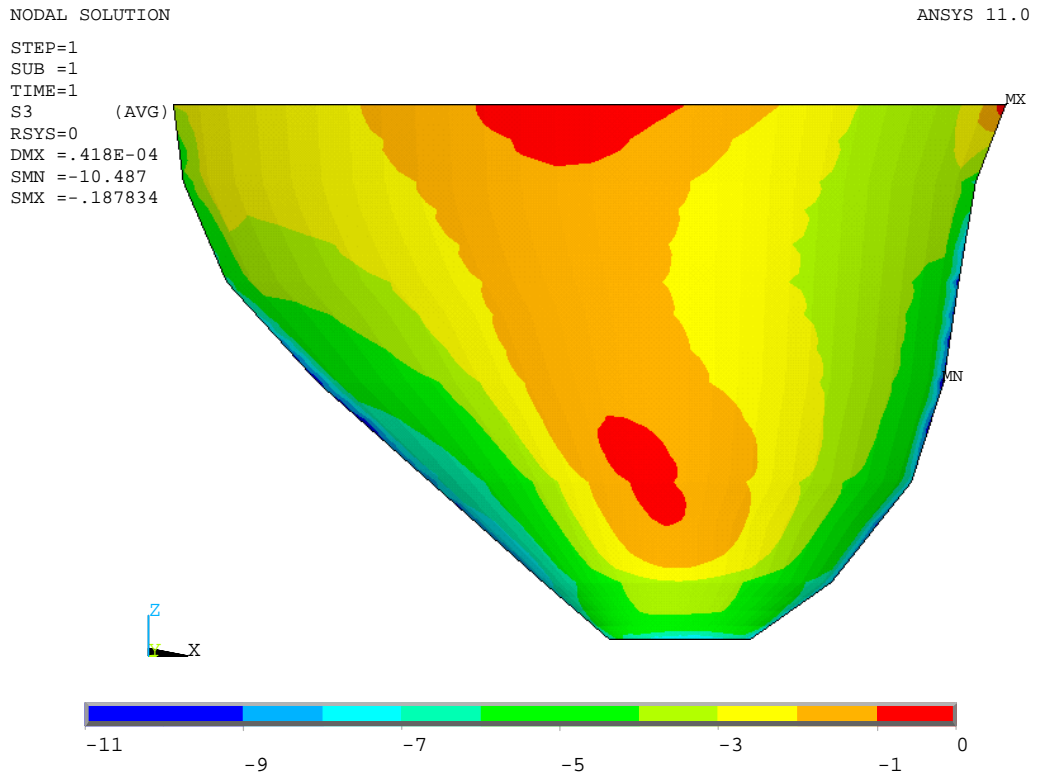


Figura 52 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

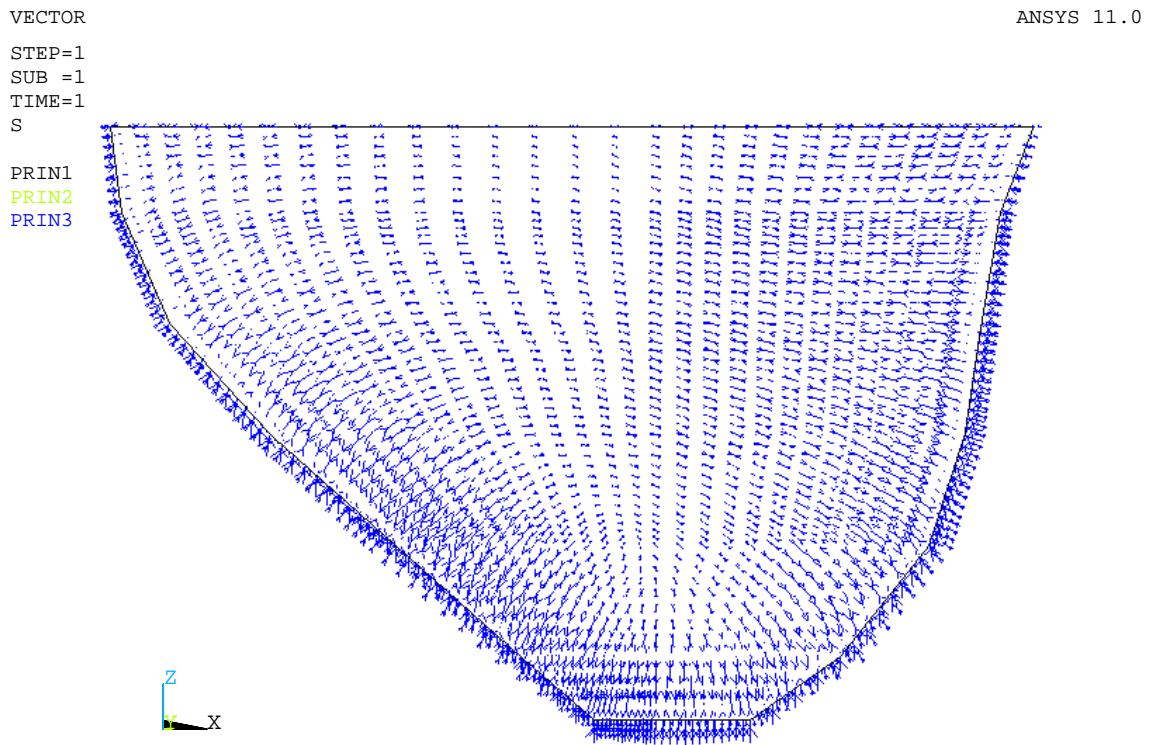


Figura 53 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.3.3. CASO 2 B)

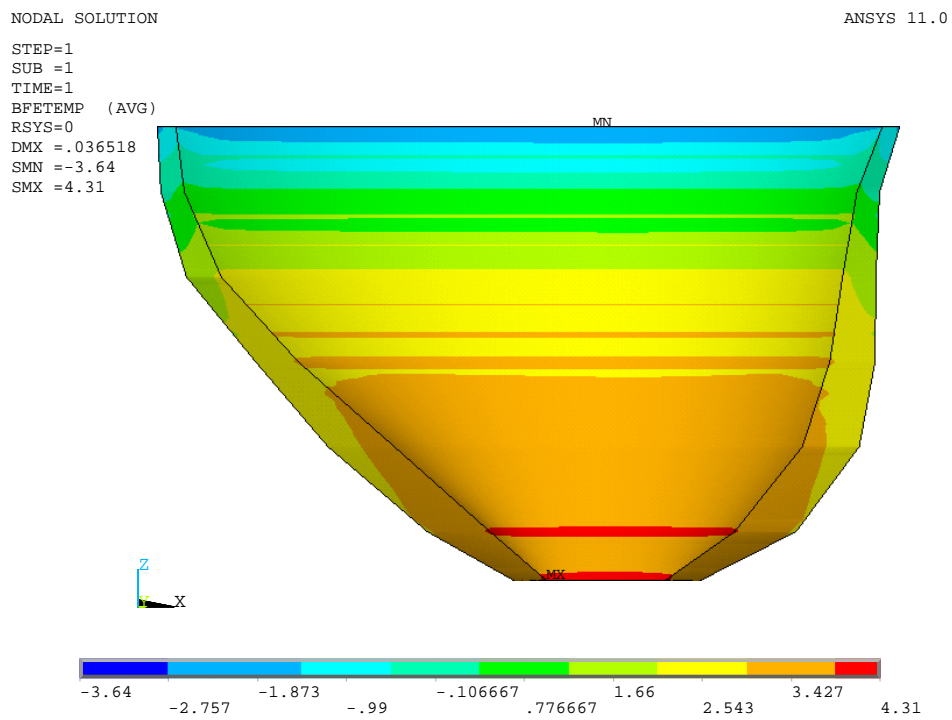


Figura 54 – Temperaturas no corpo da barragem (°C)

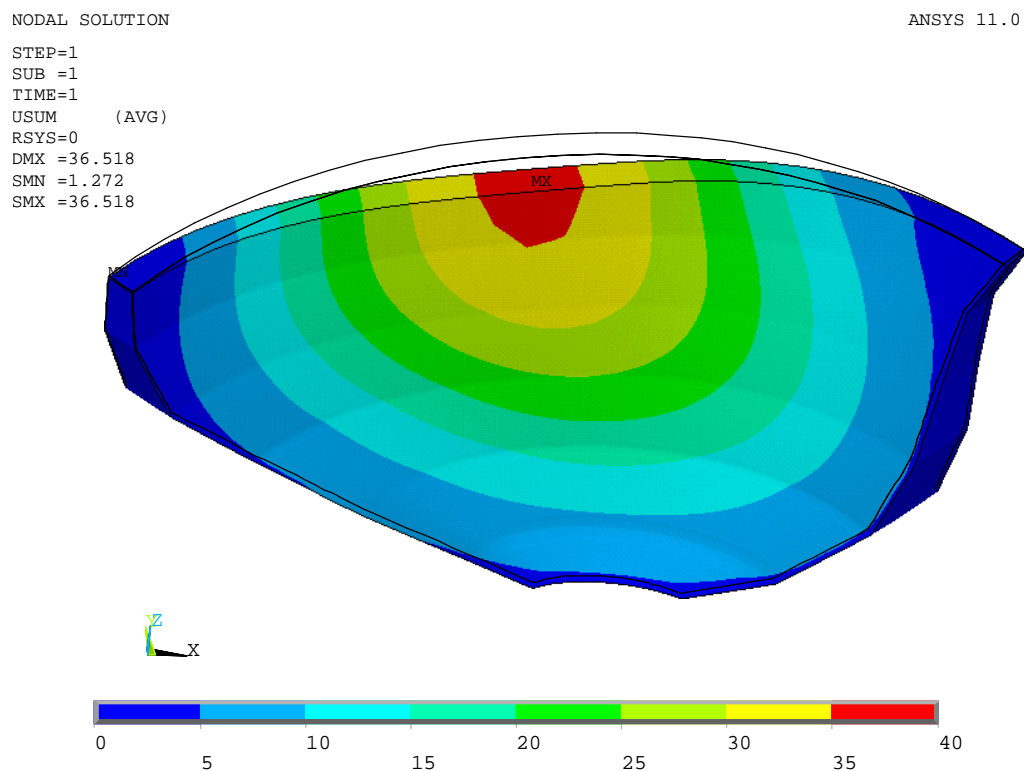


Figura 55 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =36.518
SMN =-36.032

ANSYS 11.0

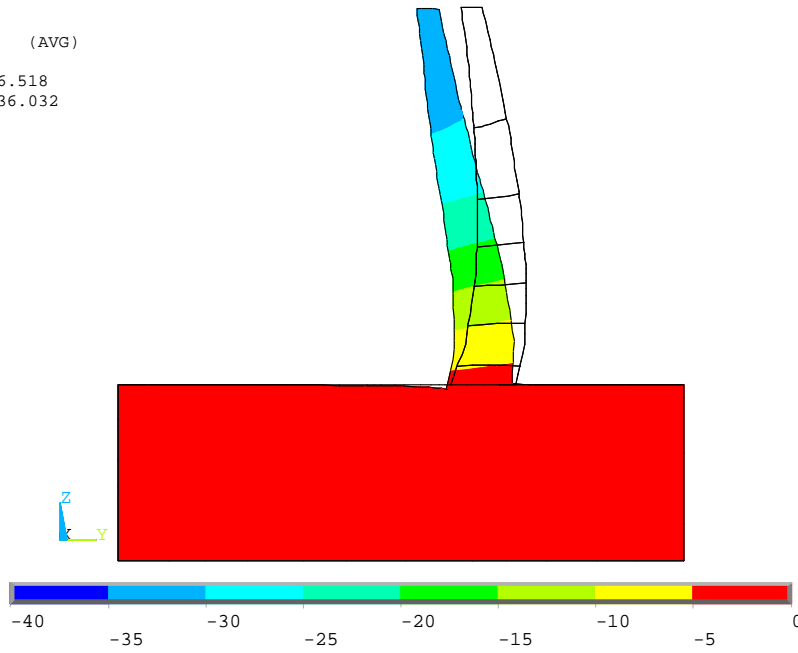


Figura 56 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ
RSYS=0
DMX =36.519
SMN =-3.803
SMX =2.951

ANSYS 11.0

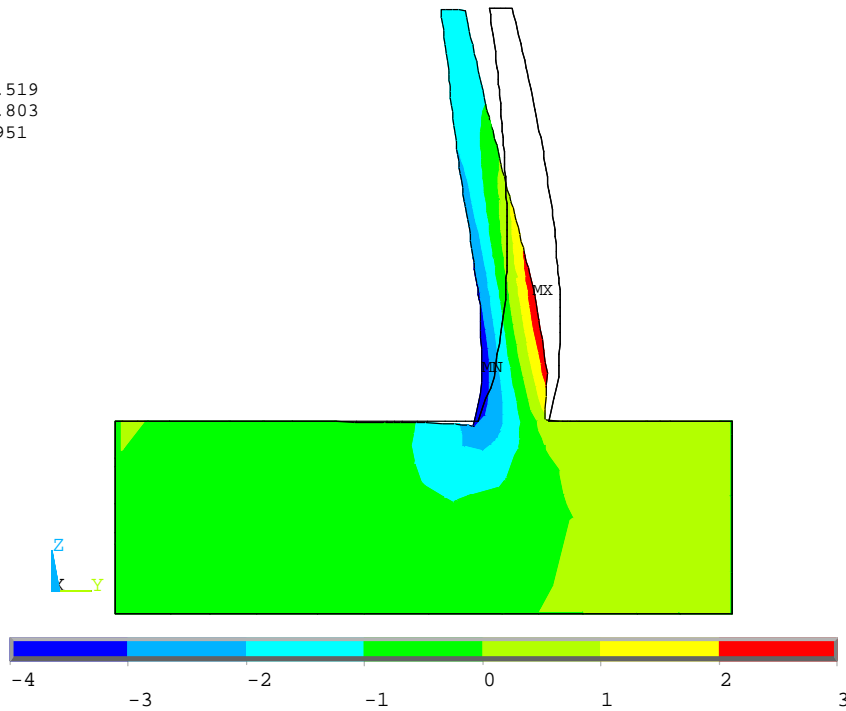


Figura 57 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

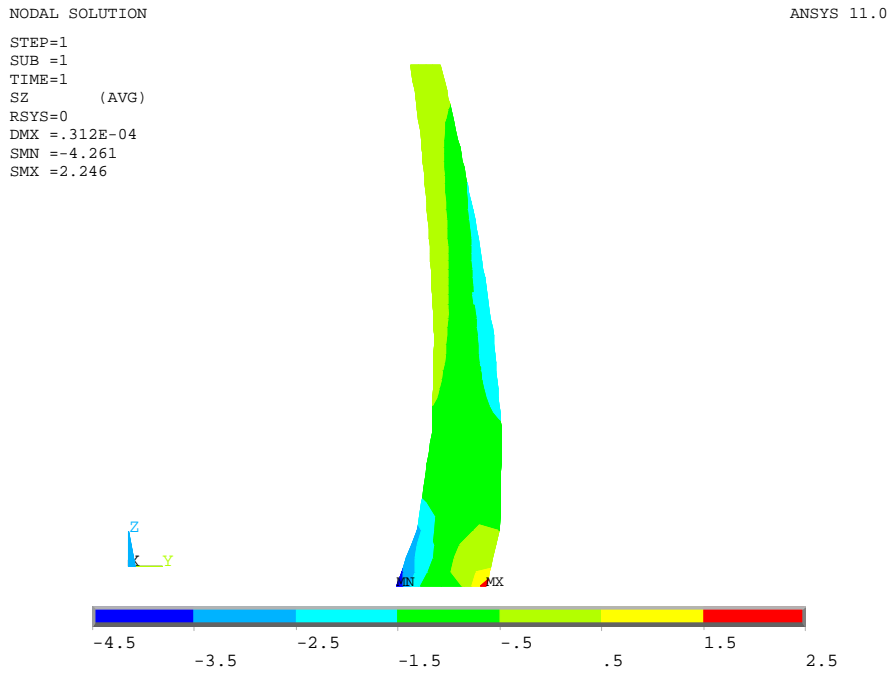


Figura 58 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

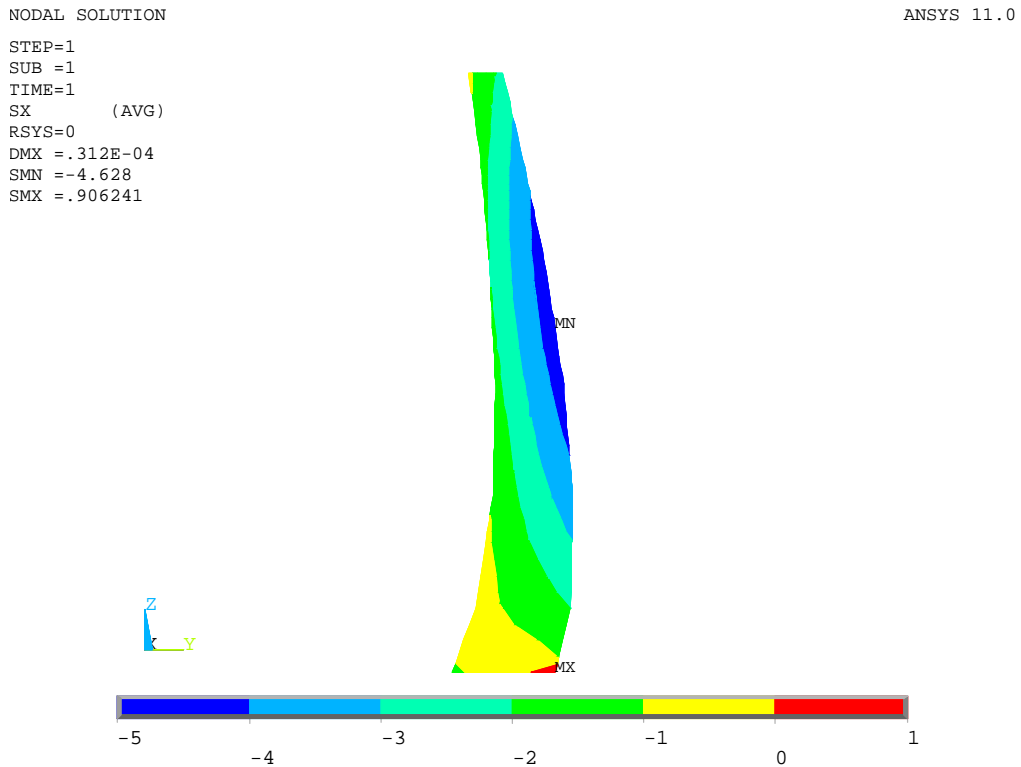


Figura 59 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

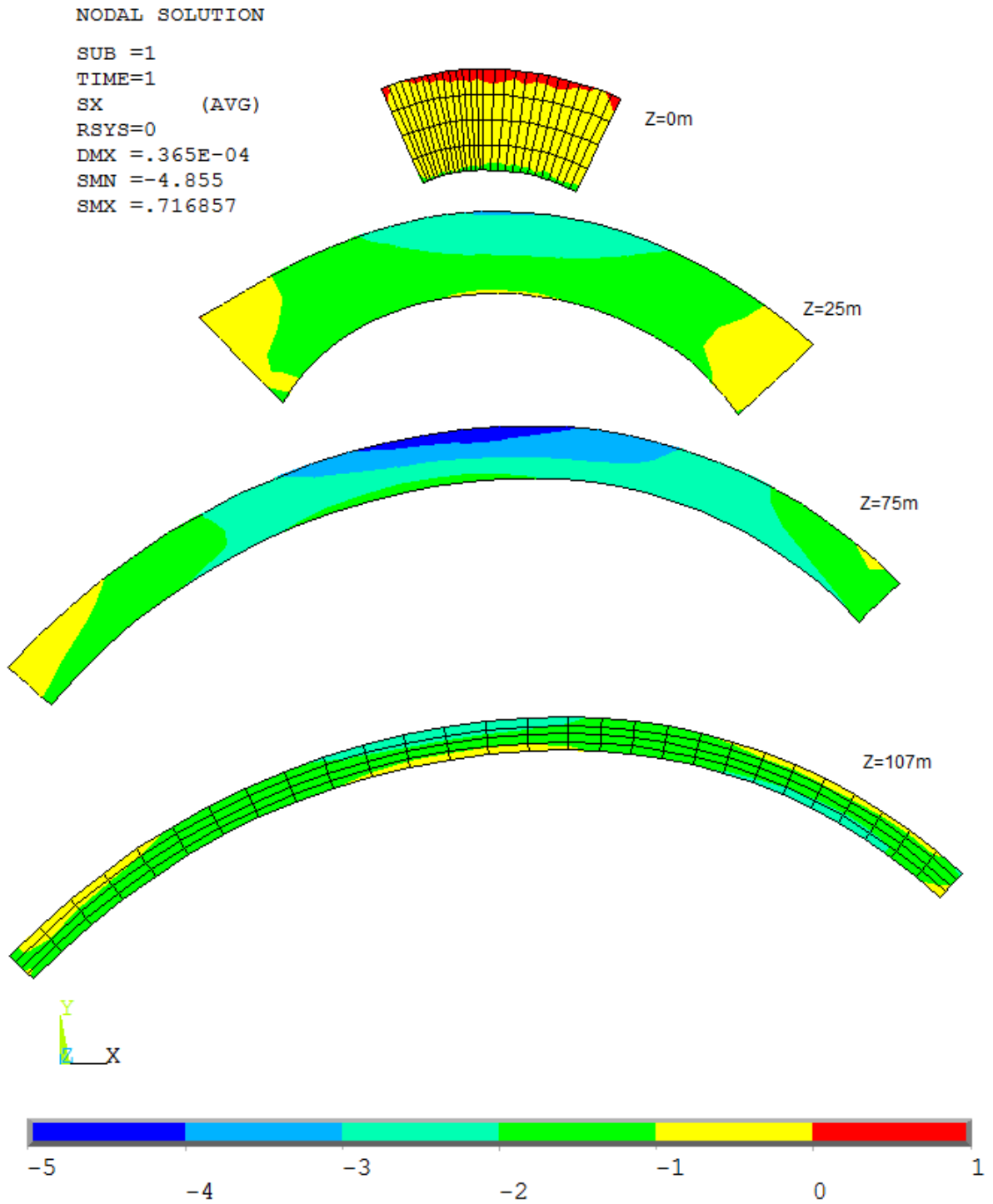


Figura 60 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.365E-04
SMN =-.896368
SMX =5.649

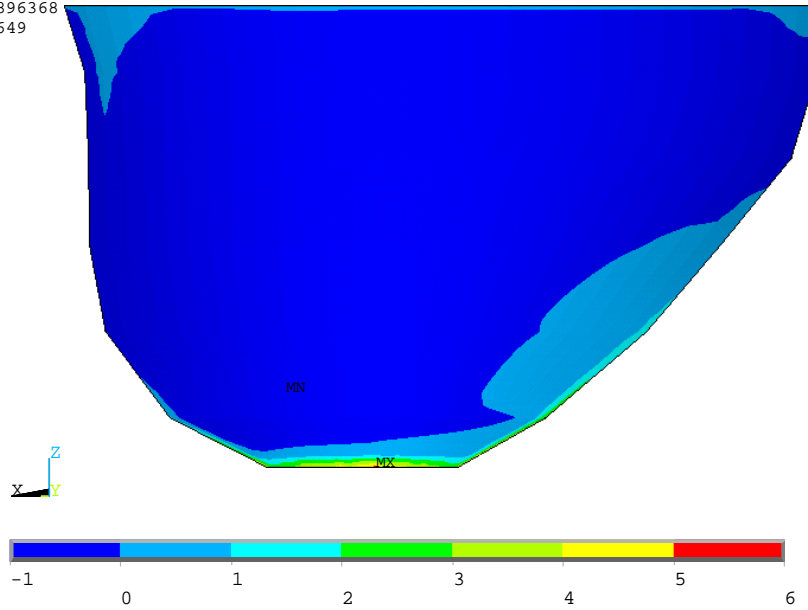


Figura 61 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

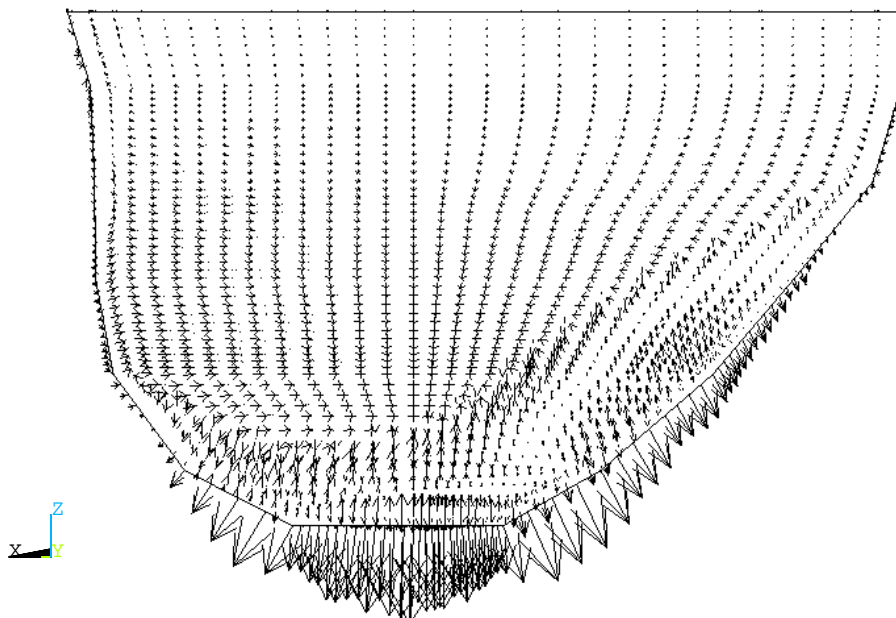


Figura 62 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.365E-04
SMN =-1.301
SMX =.650156

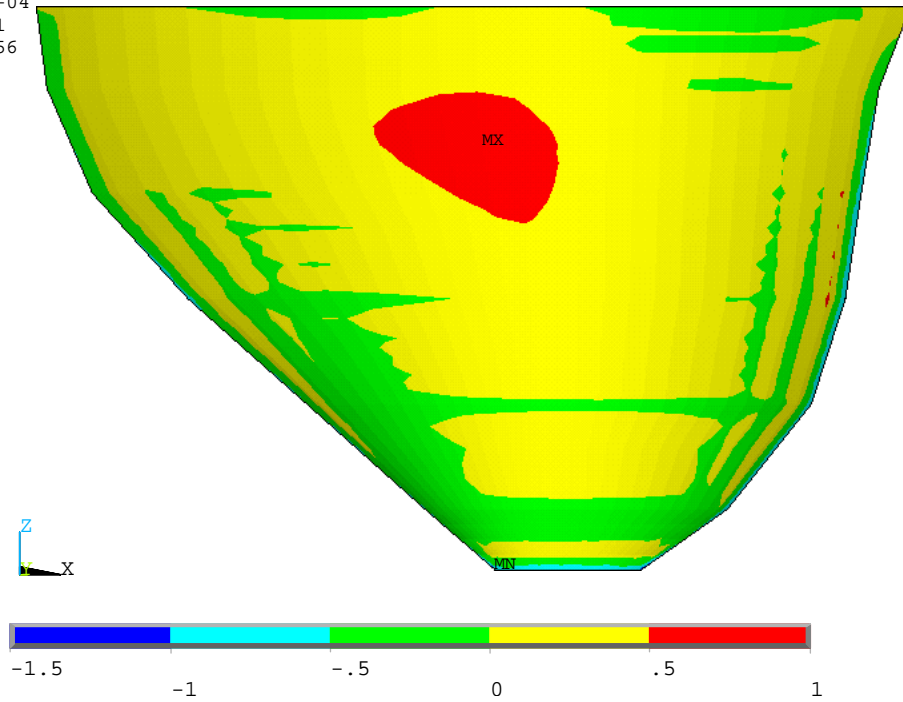


Figura 63 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

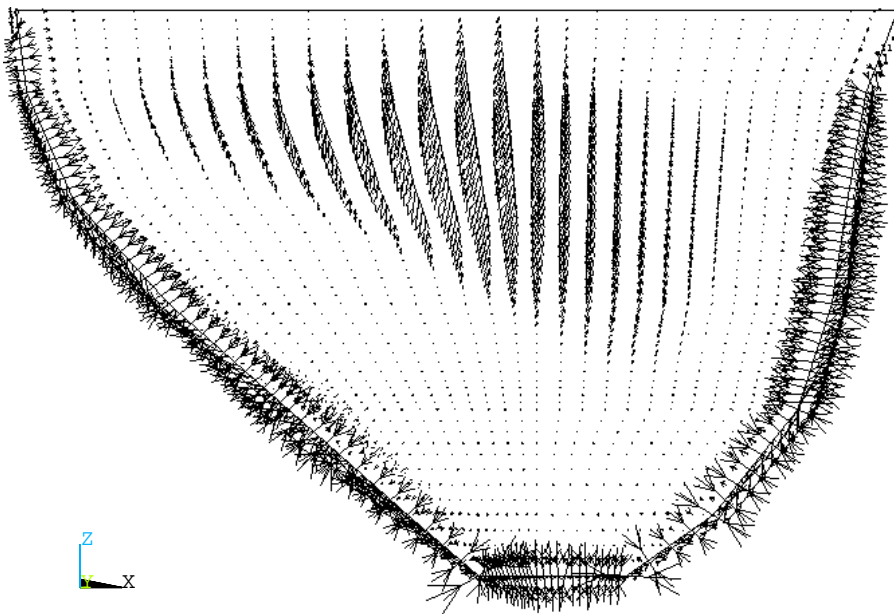


Figura 64 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX =.365E-04
SMN =-4.969
SMX =.295298

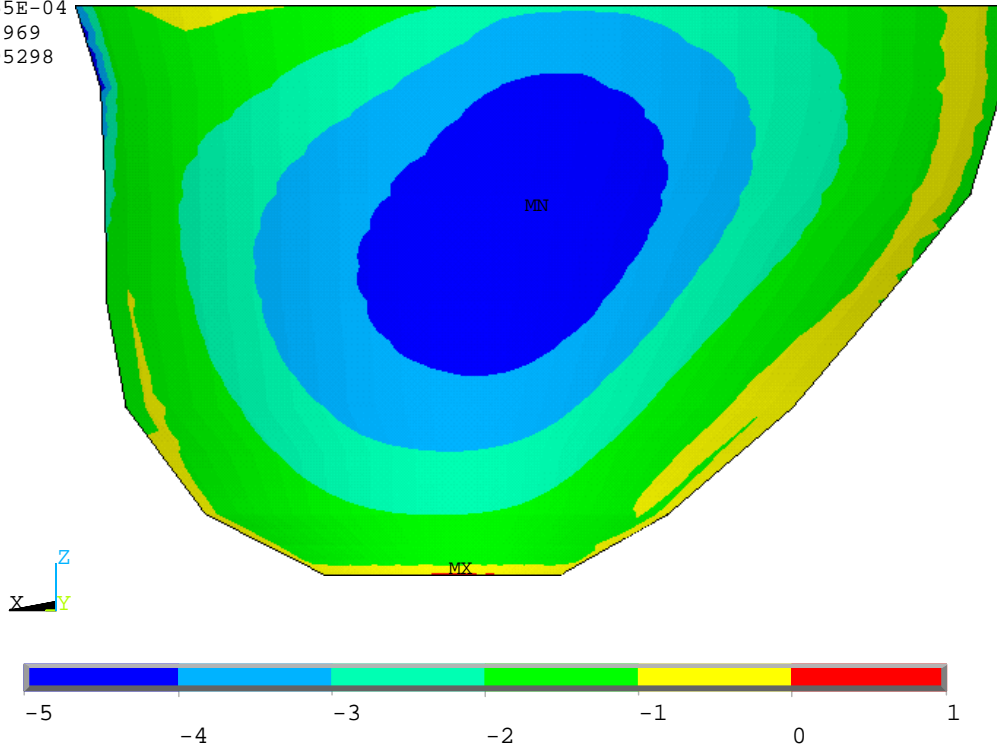


Figura 65 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

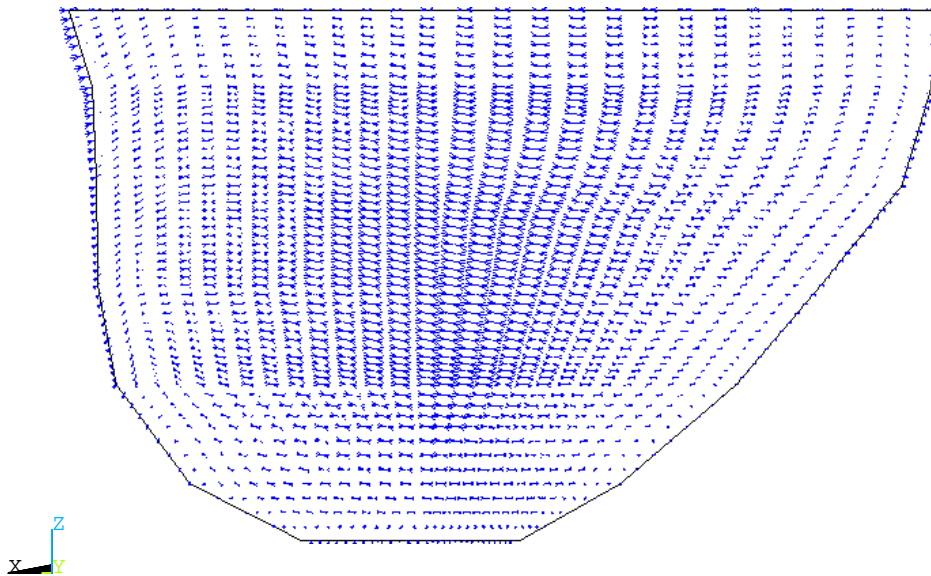


Figura 66 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

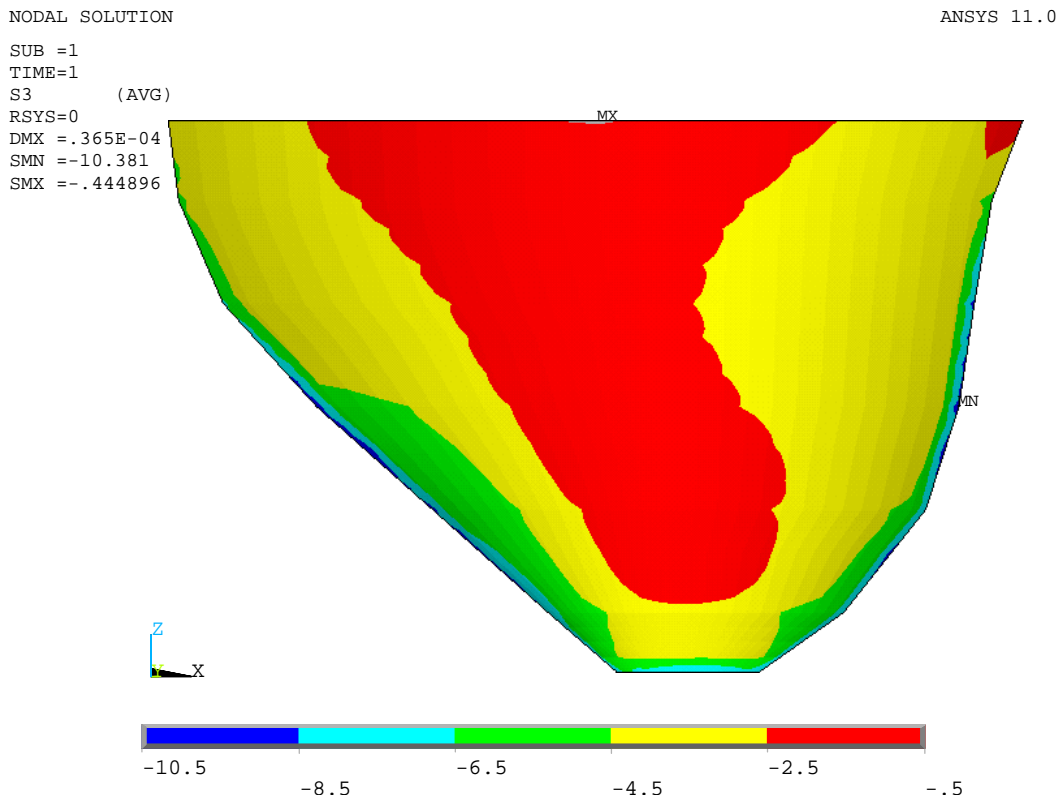


Figura 67 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

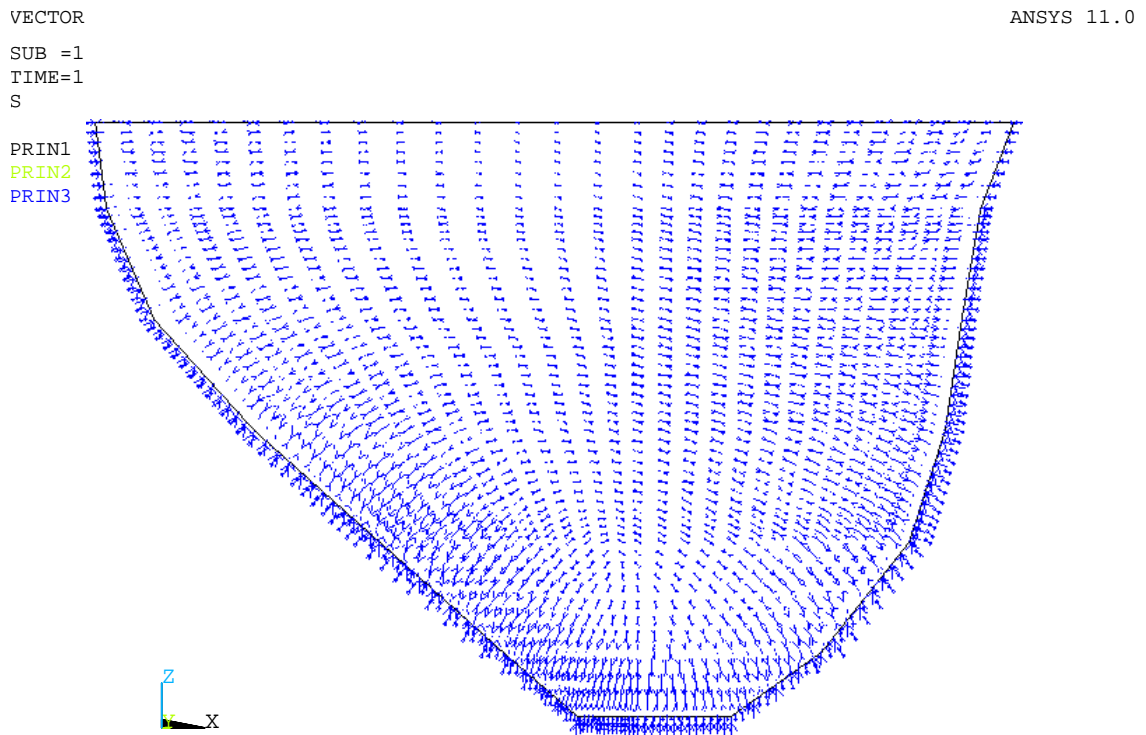


Figura 68 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.4. COMBINAÇÃO 4 (PP+PH+V+)

A2.4.1. CASO 1

```
SUB =1  
TIME=1  
BFTEMP (AVG)  
RSYS=0  
DMX = .038993  
SMN =-22.72  
SMX =9.73
```

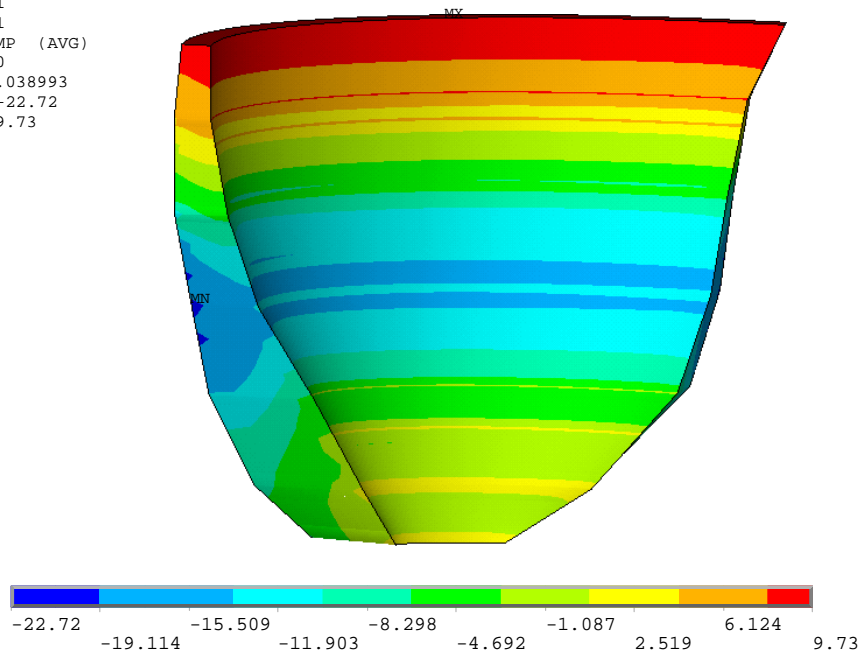


Figura 69 – Temperaturas no corpo da barragem (°C)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

```
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =38.993  
SMN =1.021  
SMX =38.993
```

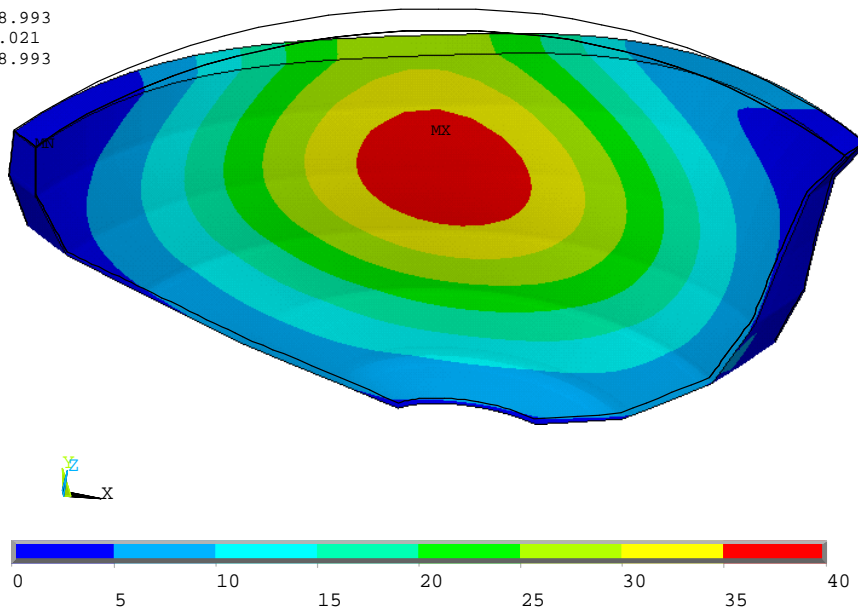


Figura 70 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =38.993
SMN =-38.433
SMX =2.871

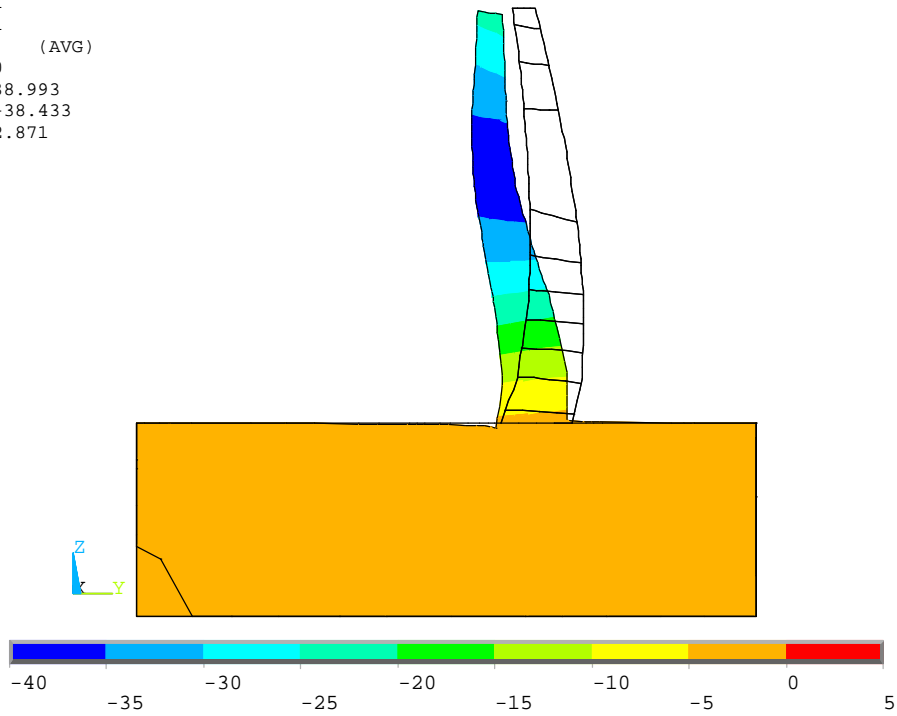


Figura 71 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =38.993
SMN =-8.291
SMX =4.63

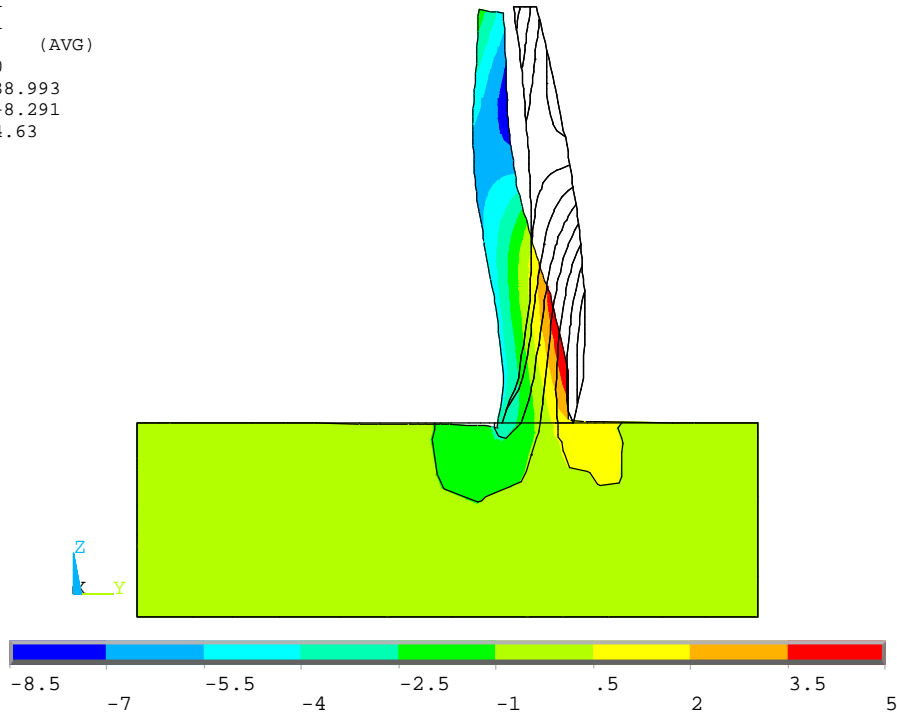


Figura 72 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.380E-04
SMN =-5.857
SMX =7.967

ANSYS 11.0

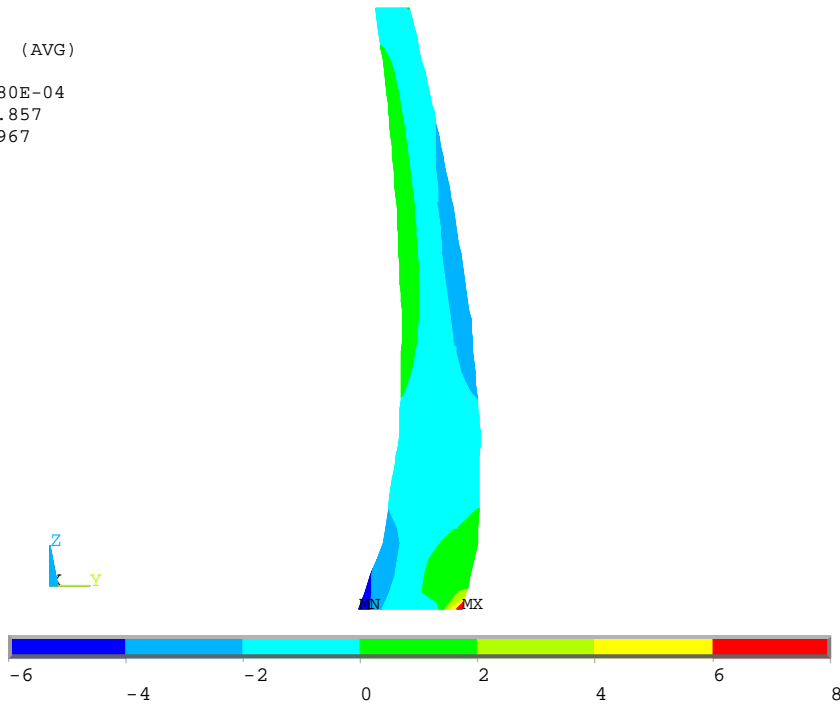


Figura 73 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.380E-04
SMN =-4.814
SMX =2.648

ANSYS 11.0

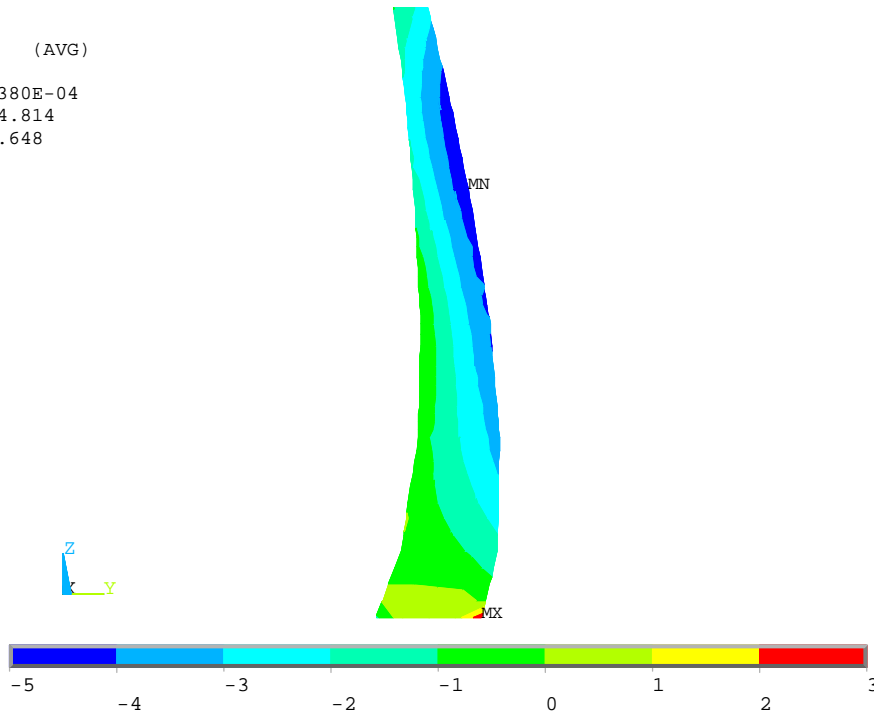


Figura 74 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

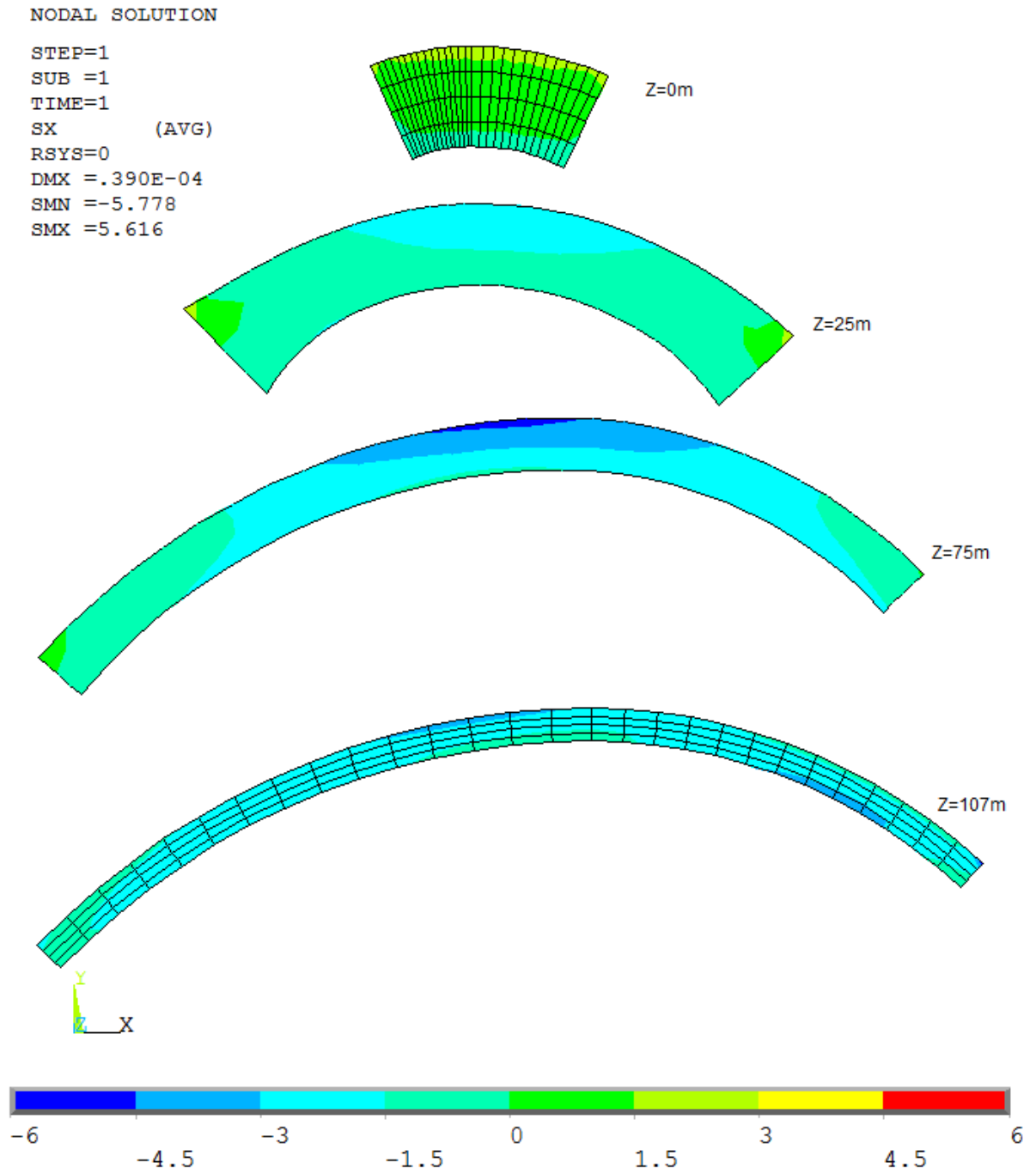


Figura 75 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX = .390E-04
SMN = -.865335
SMX =11.185

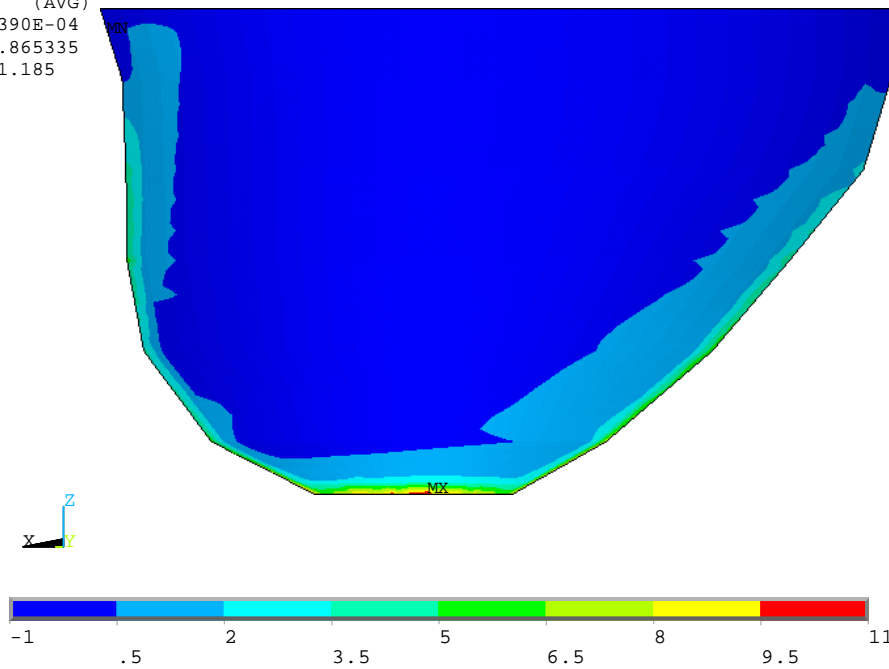


Figura 76 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

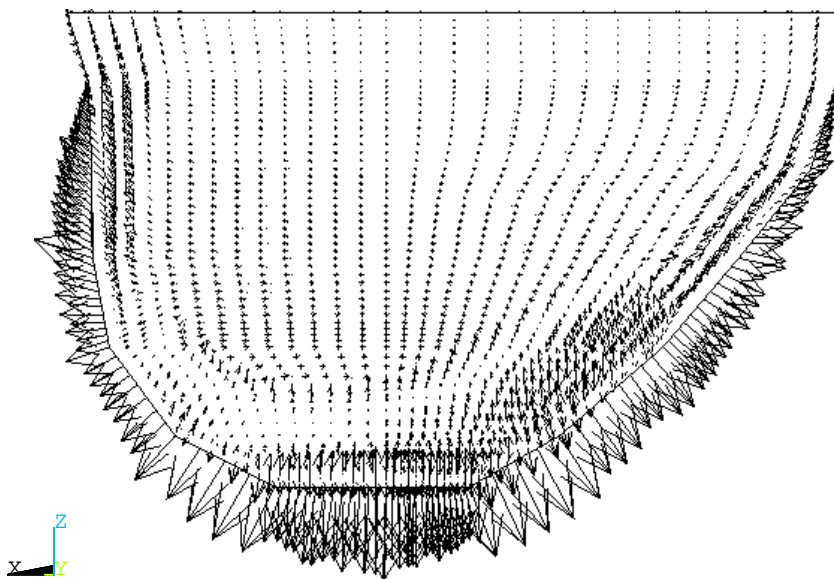


Figura 77 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX =.387E-04
SMN =-1.375
SMX =1.8

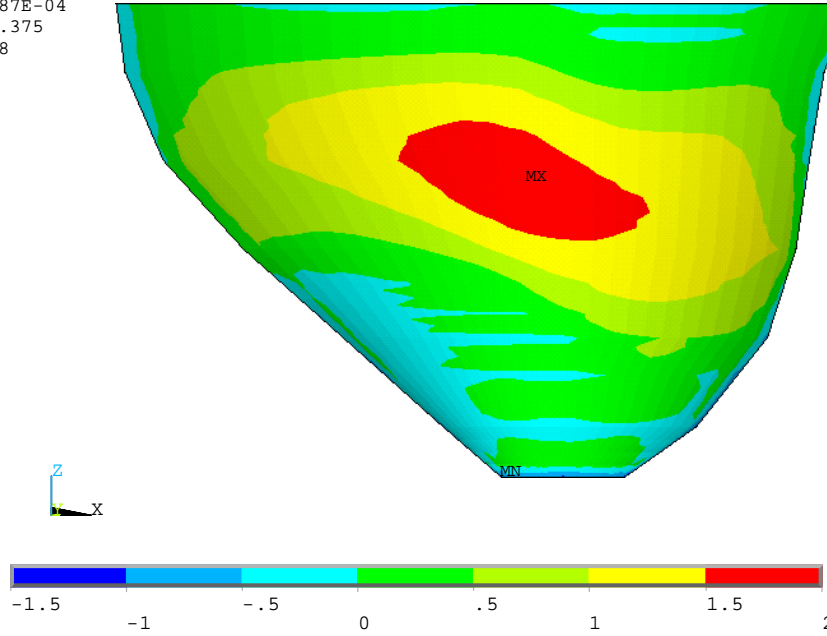


Figura 78 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

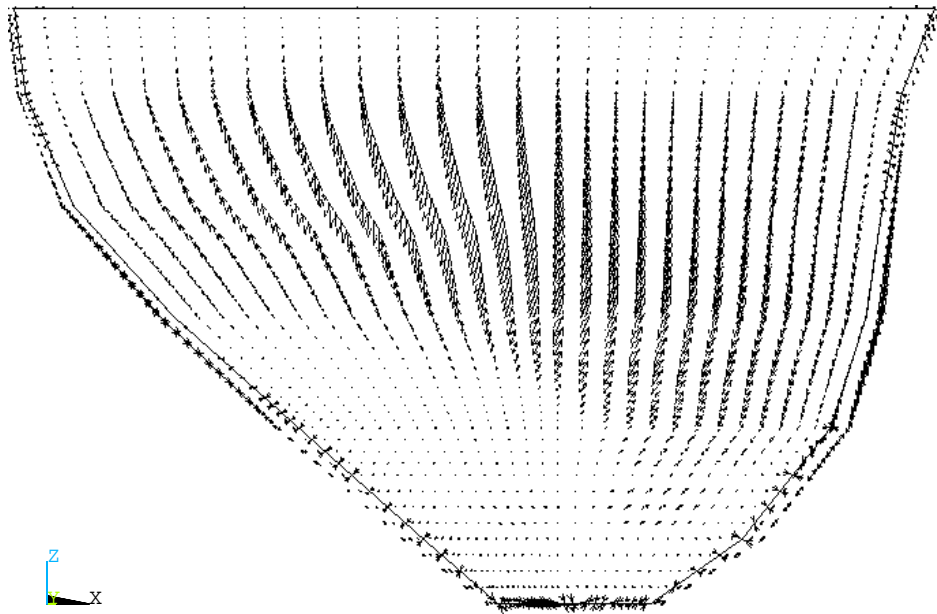


Figura 79 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX =.390E-04
SMN =-7.083
SMX =1.55

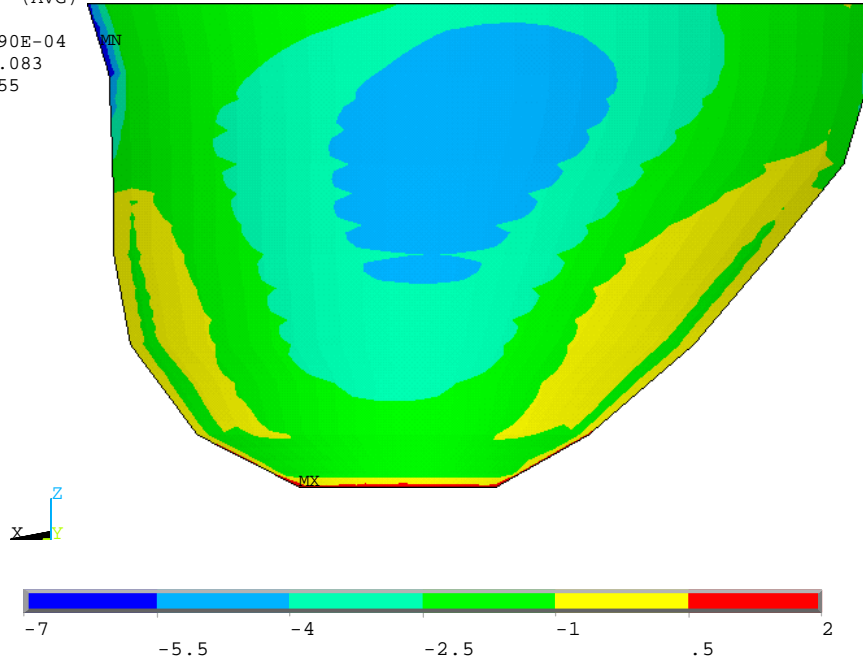


Figura 80 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

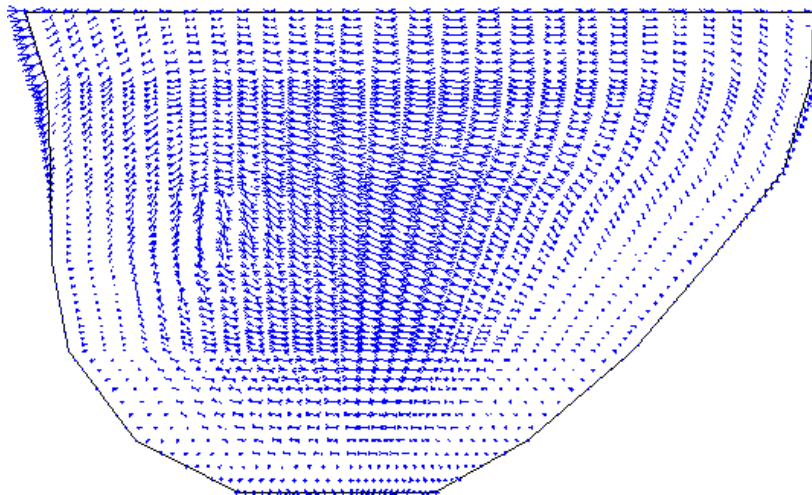


Figura 81 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

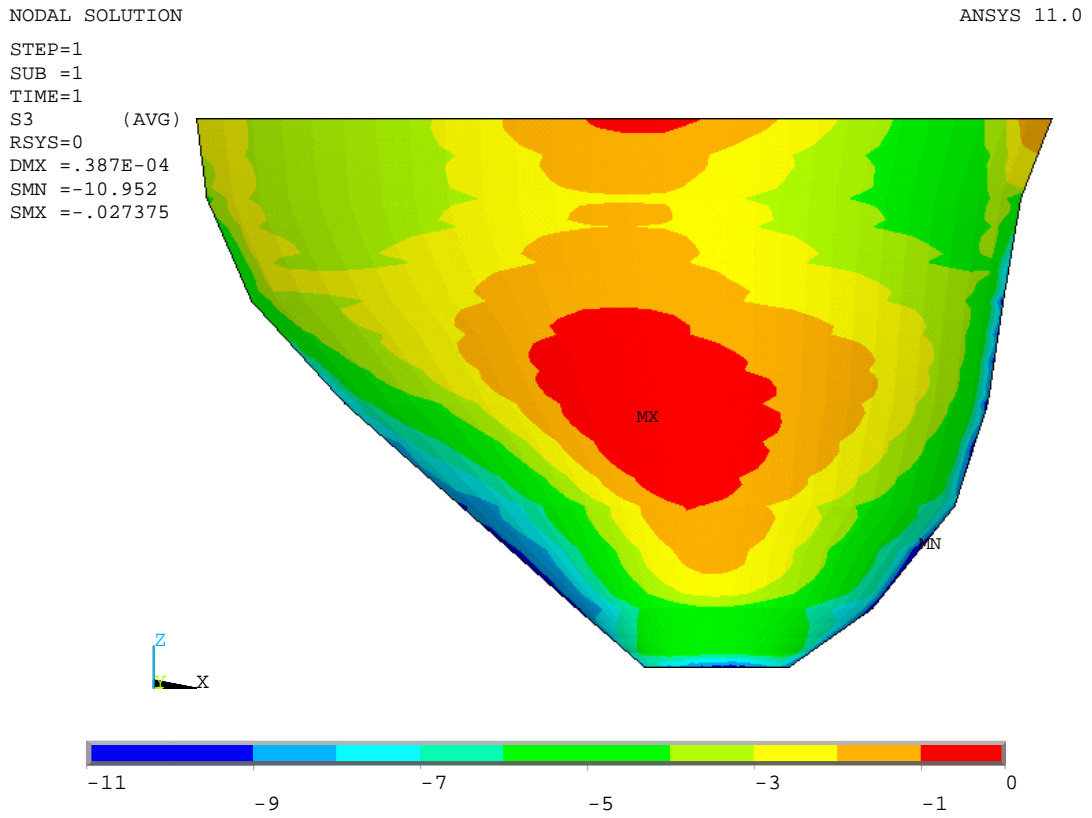


Figura 82 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

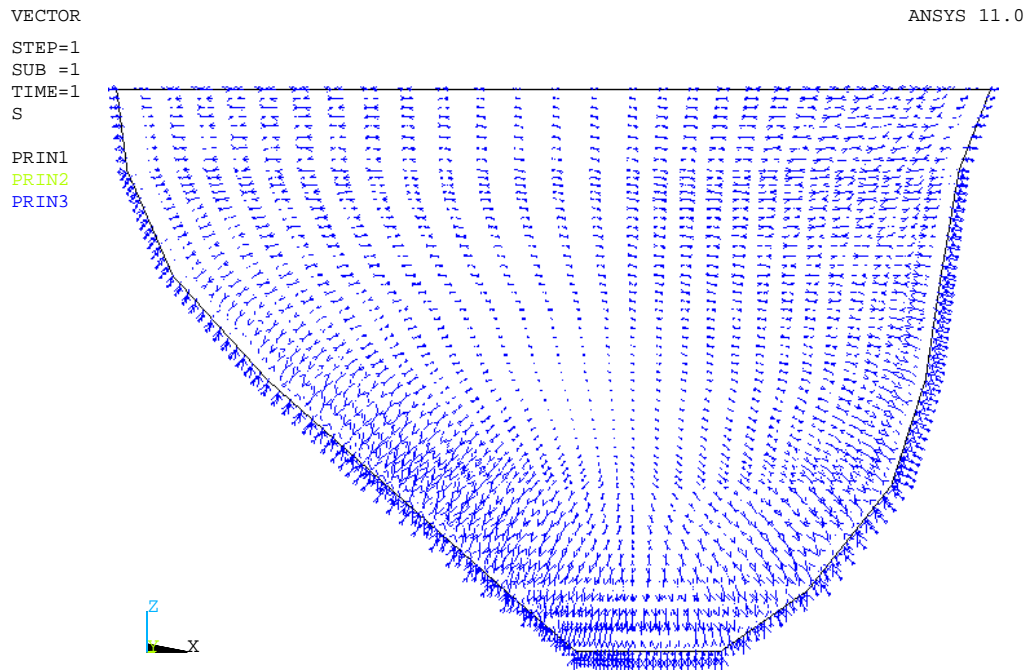


Figura 83 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.4.2. CASO 2 A)

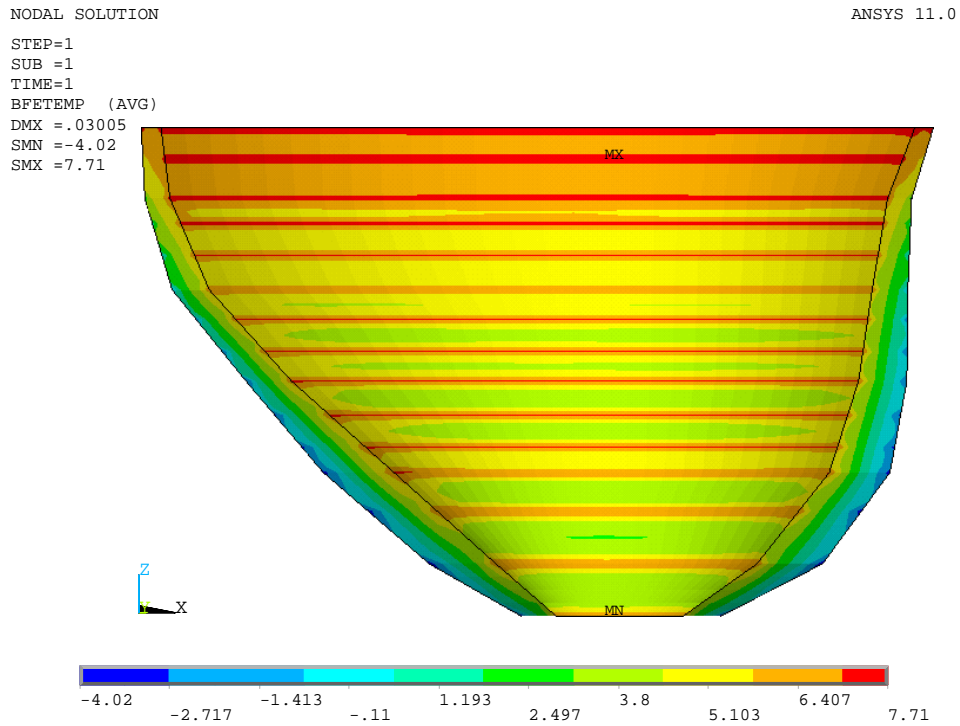


Figura 84 – Temperaturas no corpo da barragem (°C)

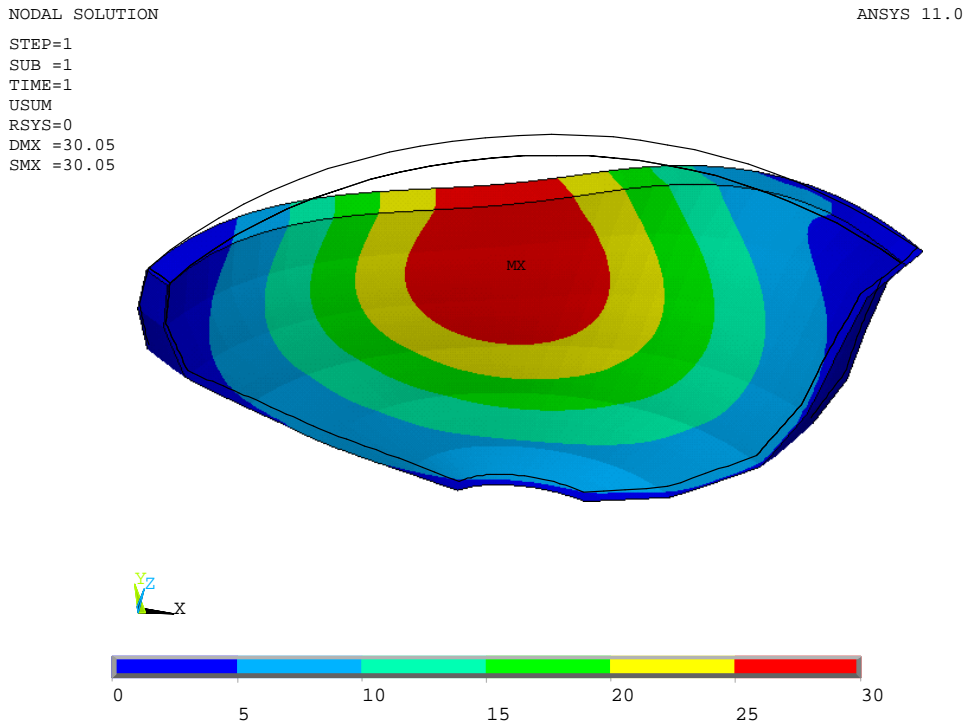


Figura 85 – Soma vectorial dos deslocamentos (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =29.945
SMN =-29.69
SMX =.3261

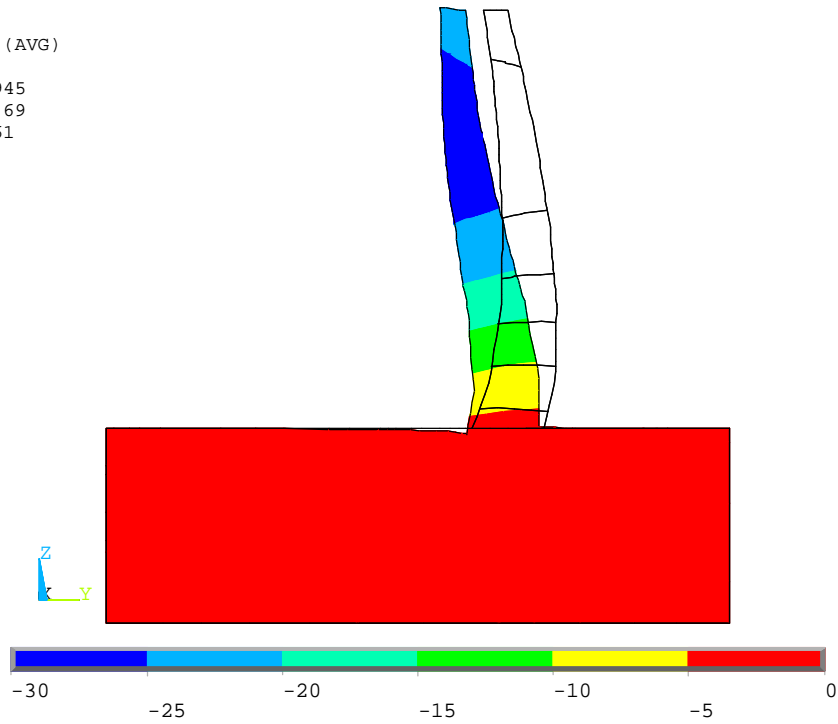


Figura 86 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =29.945
SMN =-4.072
SMX =2.485

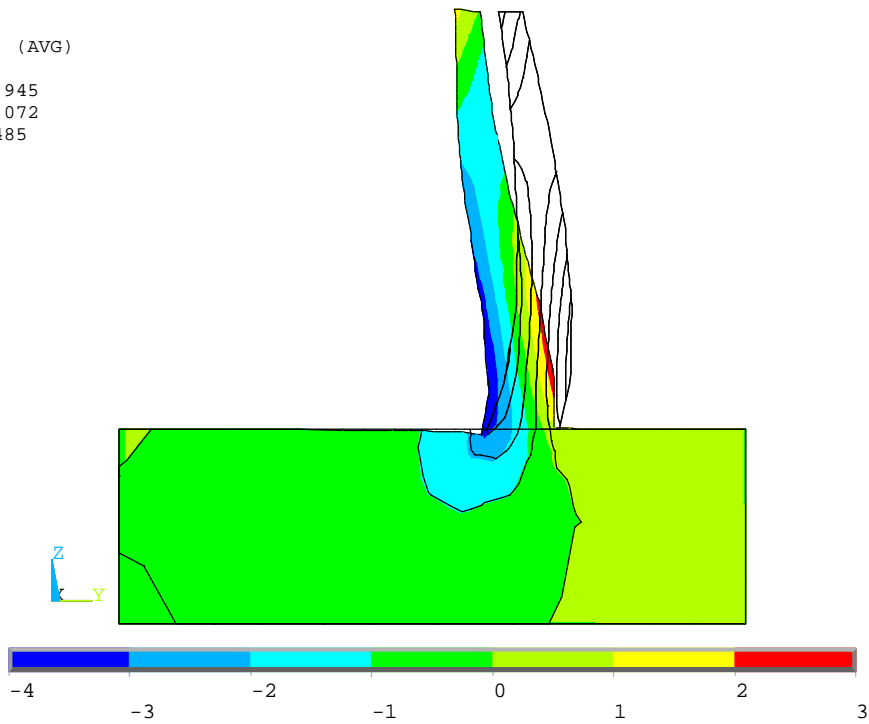


Figura 87 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX = .278E-04
SMN = -4.502
SMX = 2.662

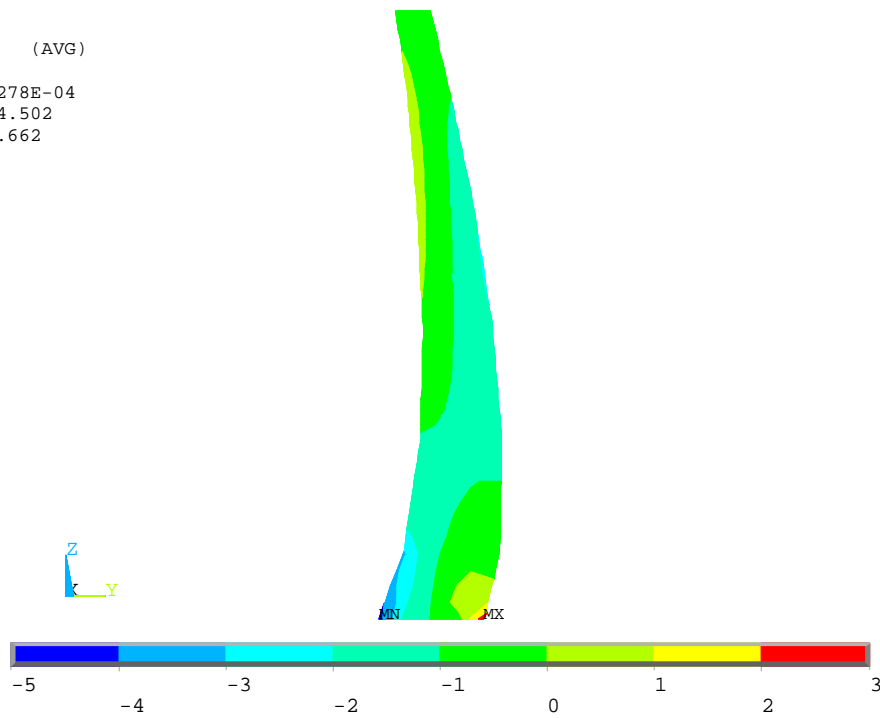


Figura 88 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX (AVG)
RSYS=0
DMX = .278E-04
SMN = -4.335
SMX = 1.164

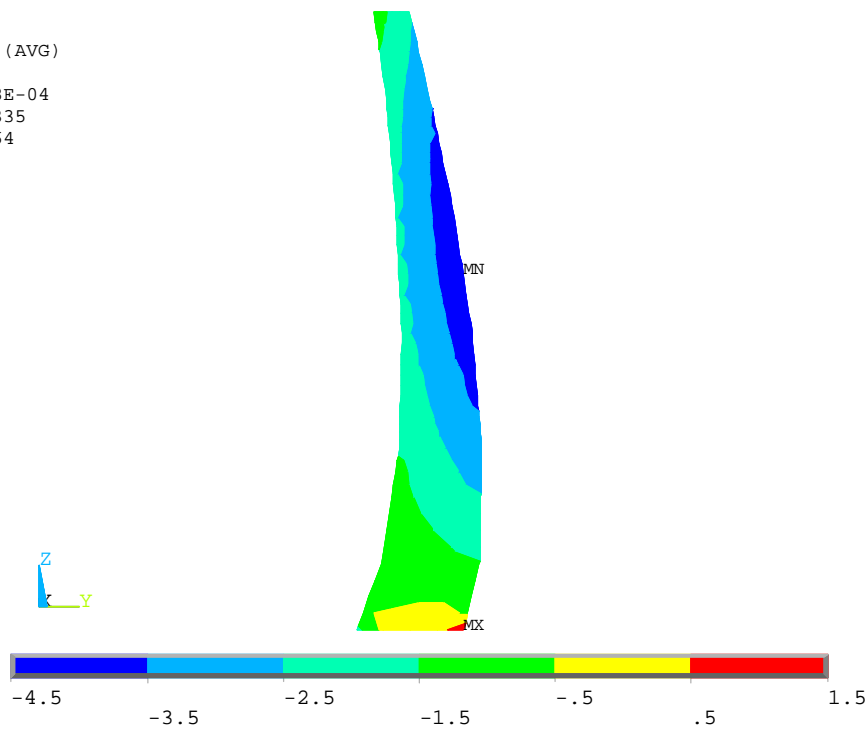


Figura 89 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

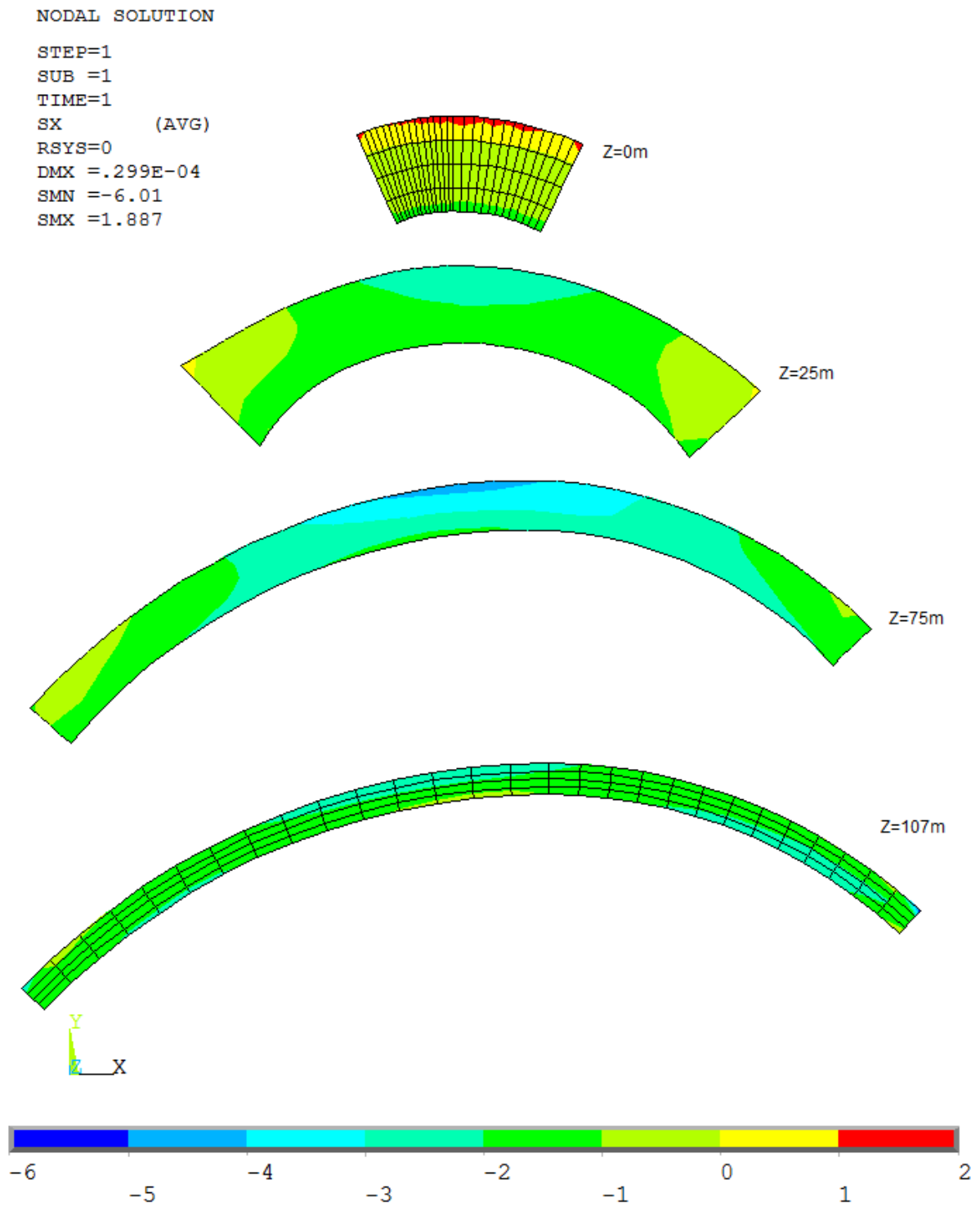


Figura 90 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)

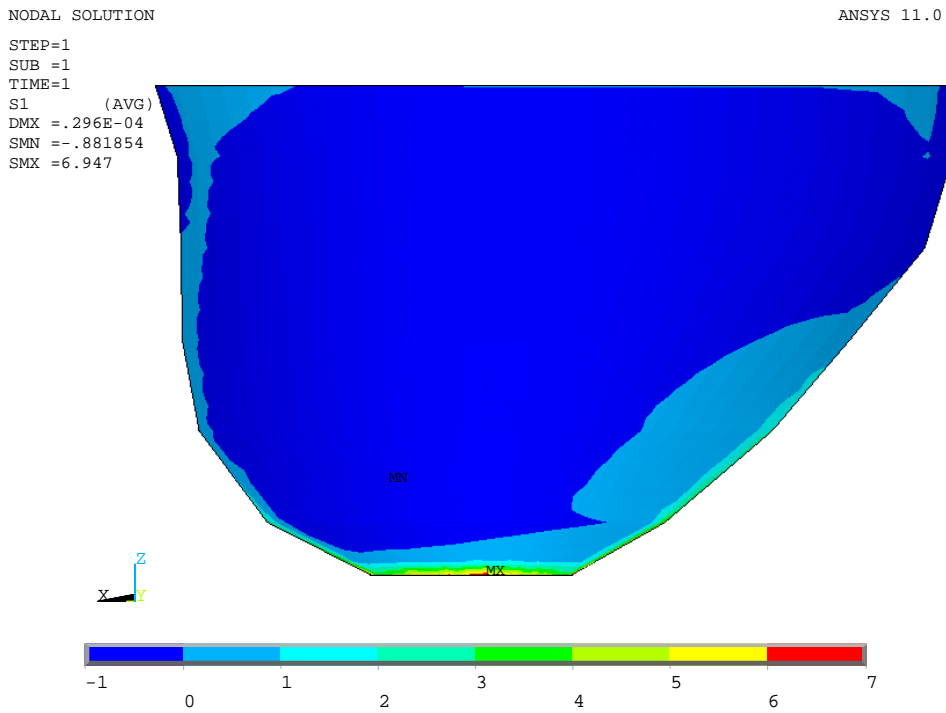


Figura 91 – Tensões principais máximas no paramento de montante (Mpa)

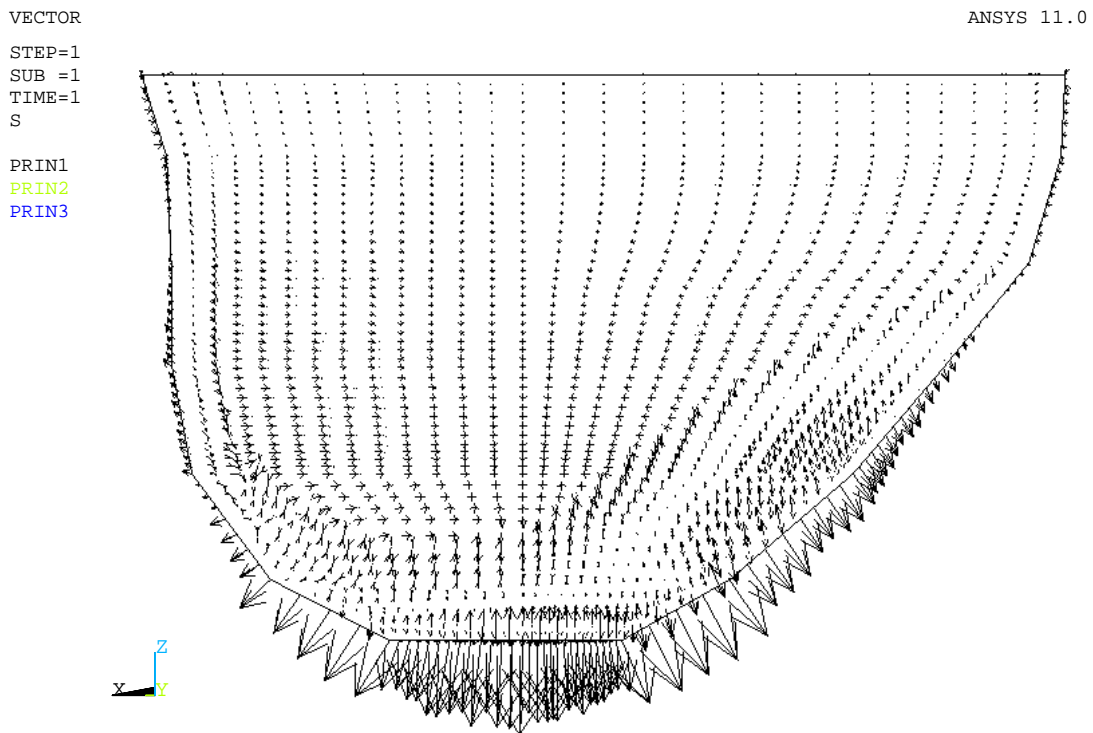


Figura 92 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de montante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX = .300E-04
SMN = -1.509
SMX = .676463

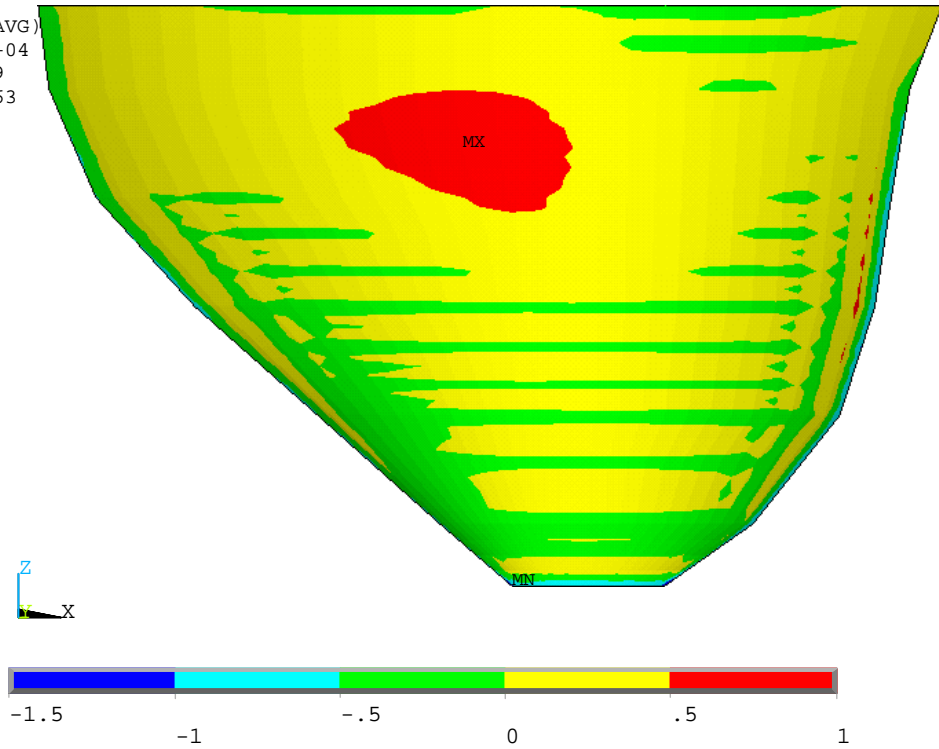


Figura 93 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S
PRIN1
PRIN2
PRIN3

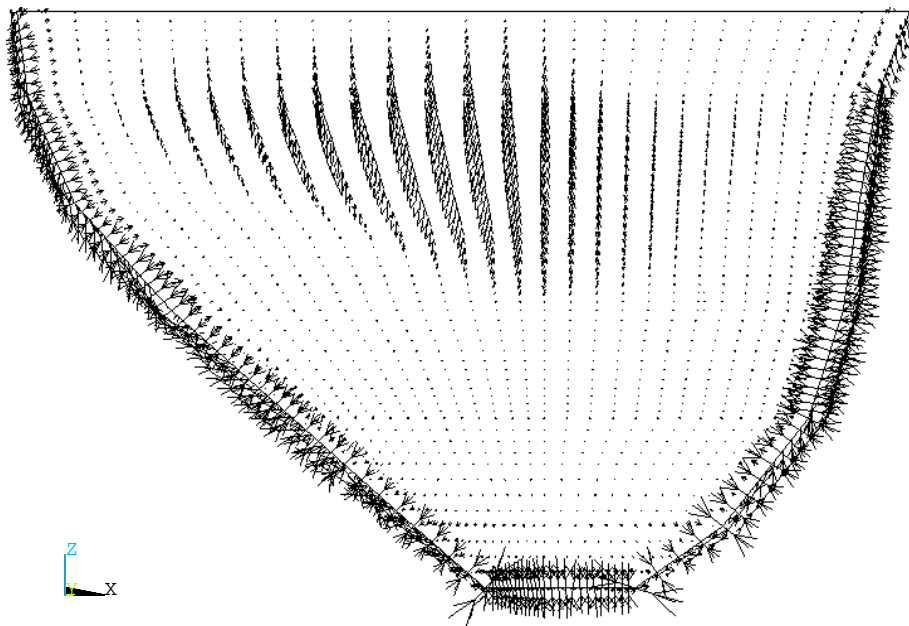


Figura 94 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX =.296E-04
SMN =-6.937
SMX =.707715

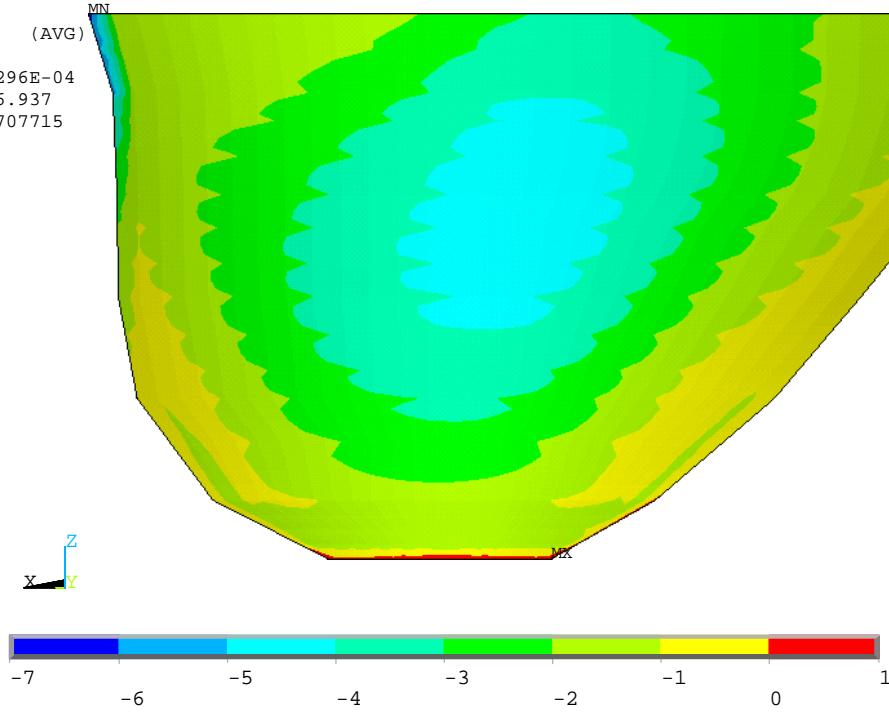


Figura 95 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
S

PRIN1
PRIN2
PRIN3

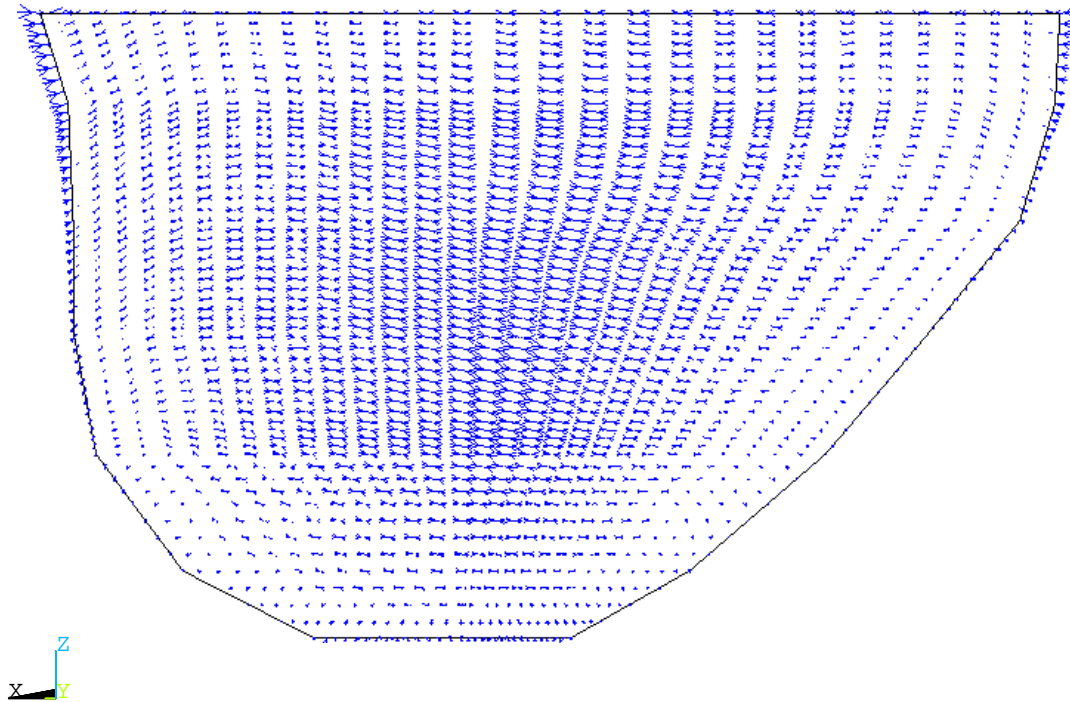


Figura 96 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

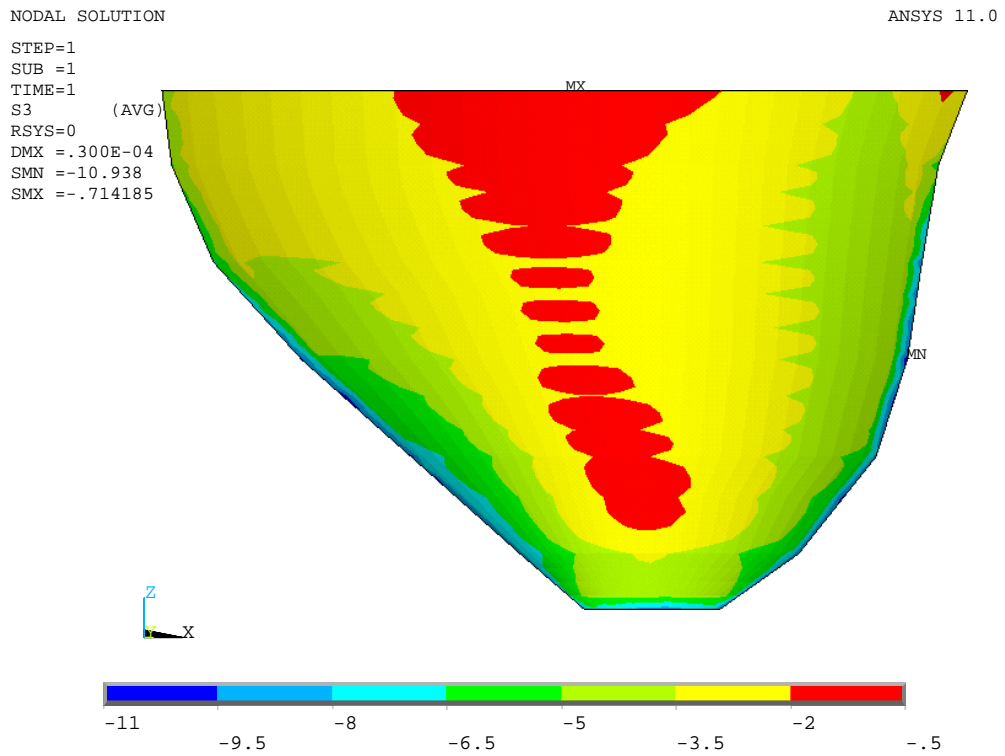


Figura 97 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

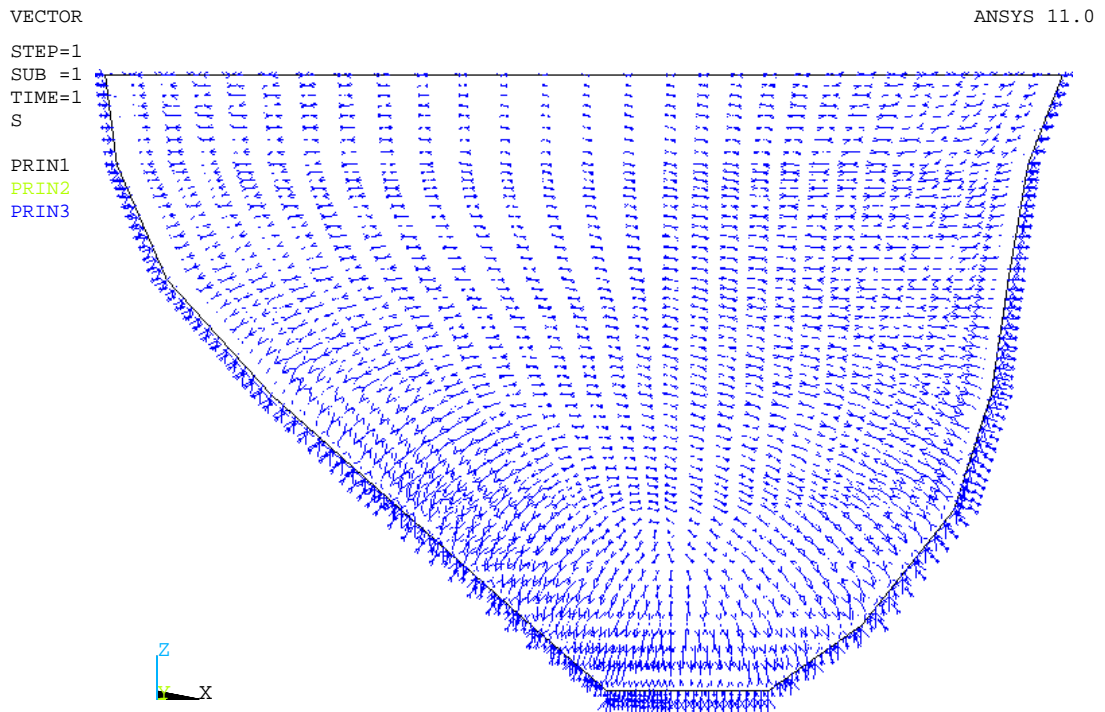
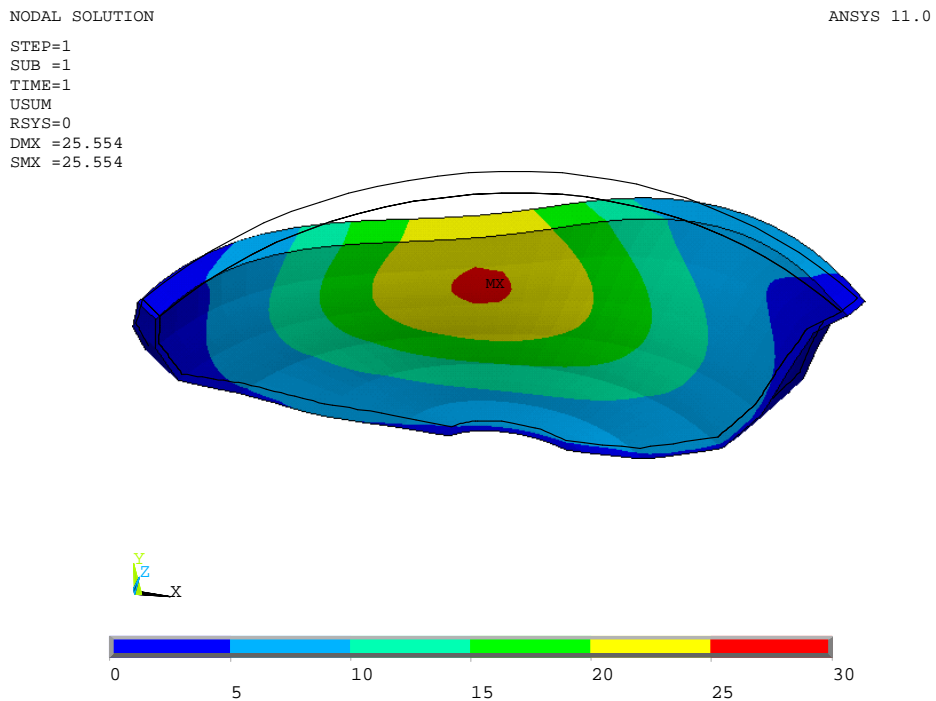
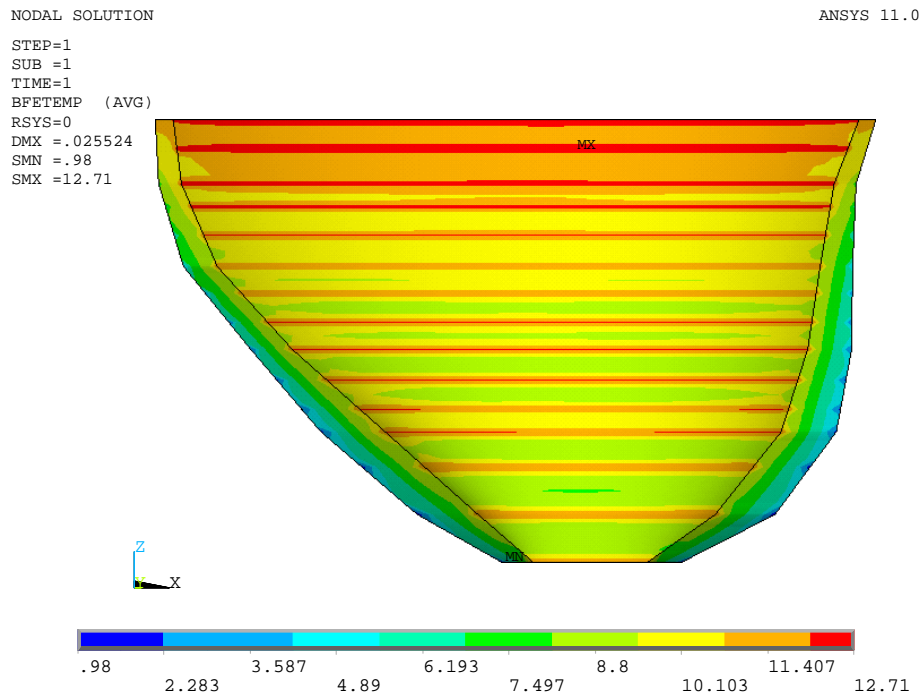


Figura 98 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante

A2.4.3. CASO 2 B)



NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY
RSYS=0
DMX =25.554
SMN =-25.316
SMX =.933965

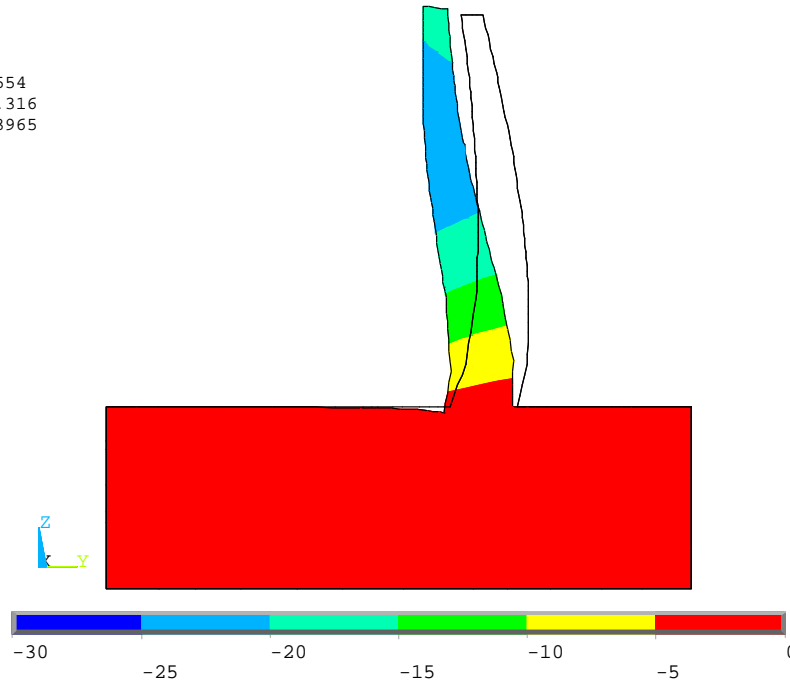


Figura 101 – Deslocamentos segundo a direcção y (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ
RSYS=0
DMX =25.554
SMN =-3.676
SMX =4.971

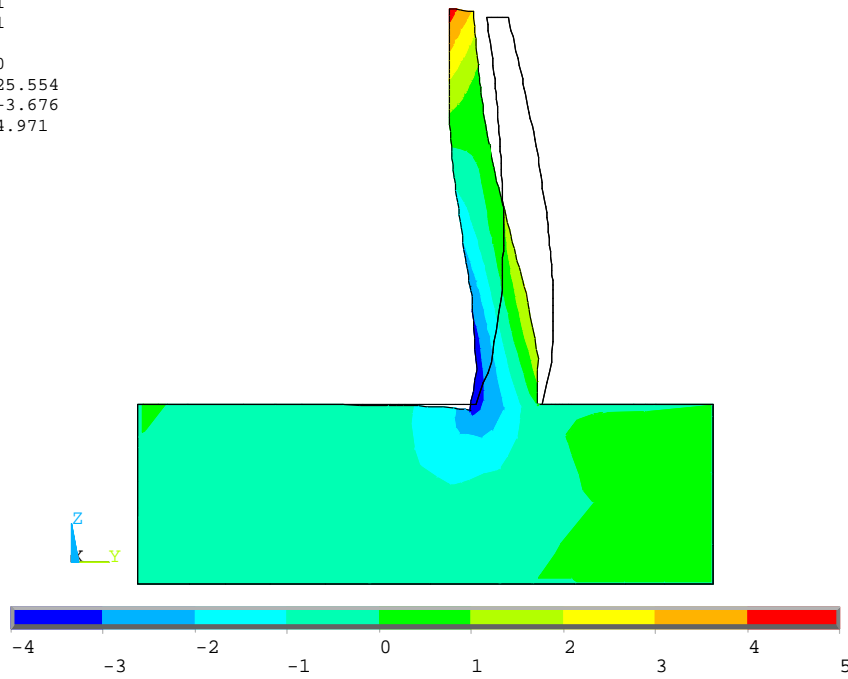


Figura 102 – Deslocamentos segundo a direcção z (mm)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.233E-04
SMN =-4.425
SMX =1.645

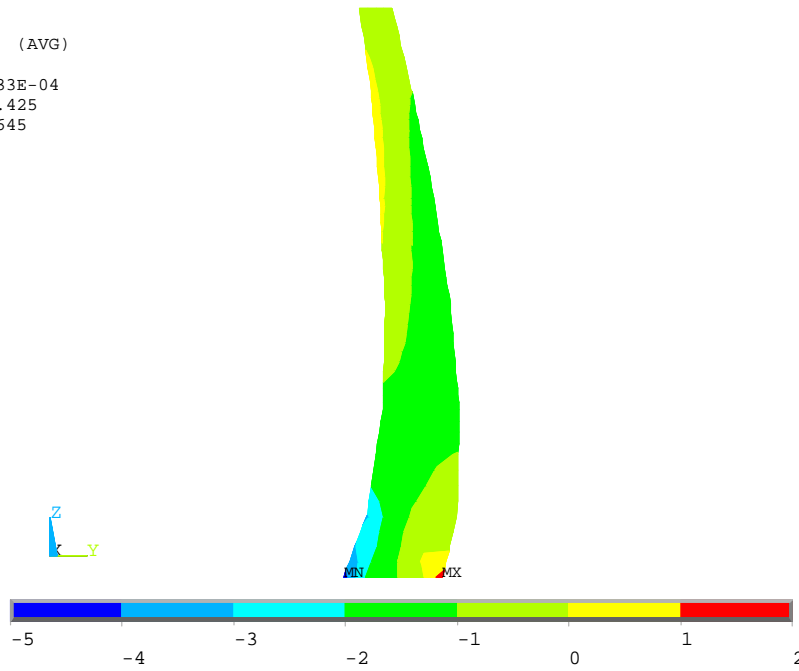


Figura 103 – Tensões (σ_z) ao longo da consola central na direcção das consolas (Mpa)

NODAL SOLUTION

ANSYS 11.0

SUB =1
TIME=1
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.233E-04
SMN =-4.129
SMX =.737906

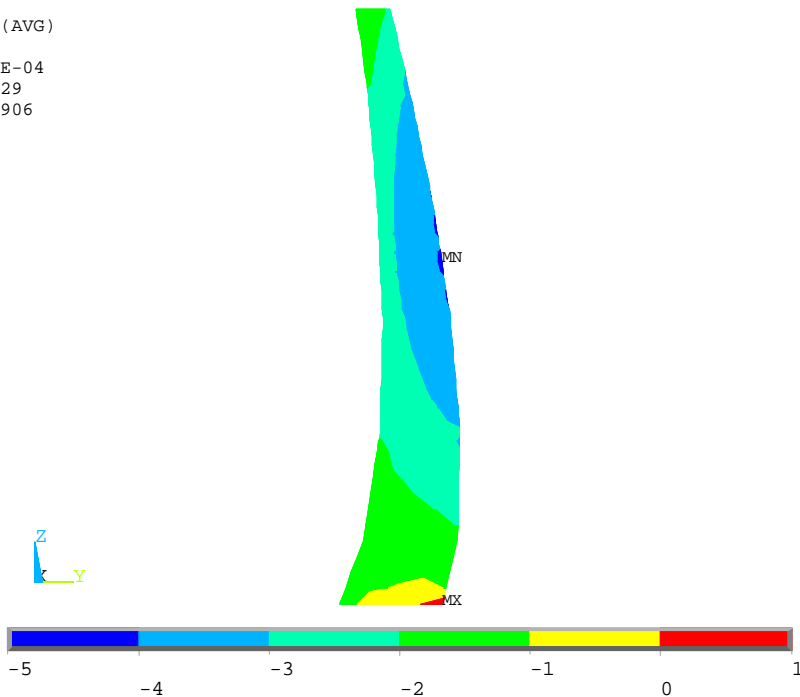


Figura 104 – Tensões (σ_x) ao longo da consola central na direcção dos arcos (Mpa)

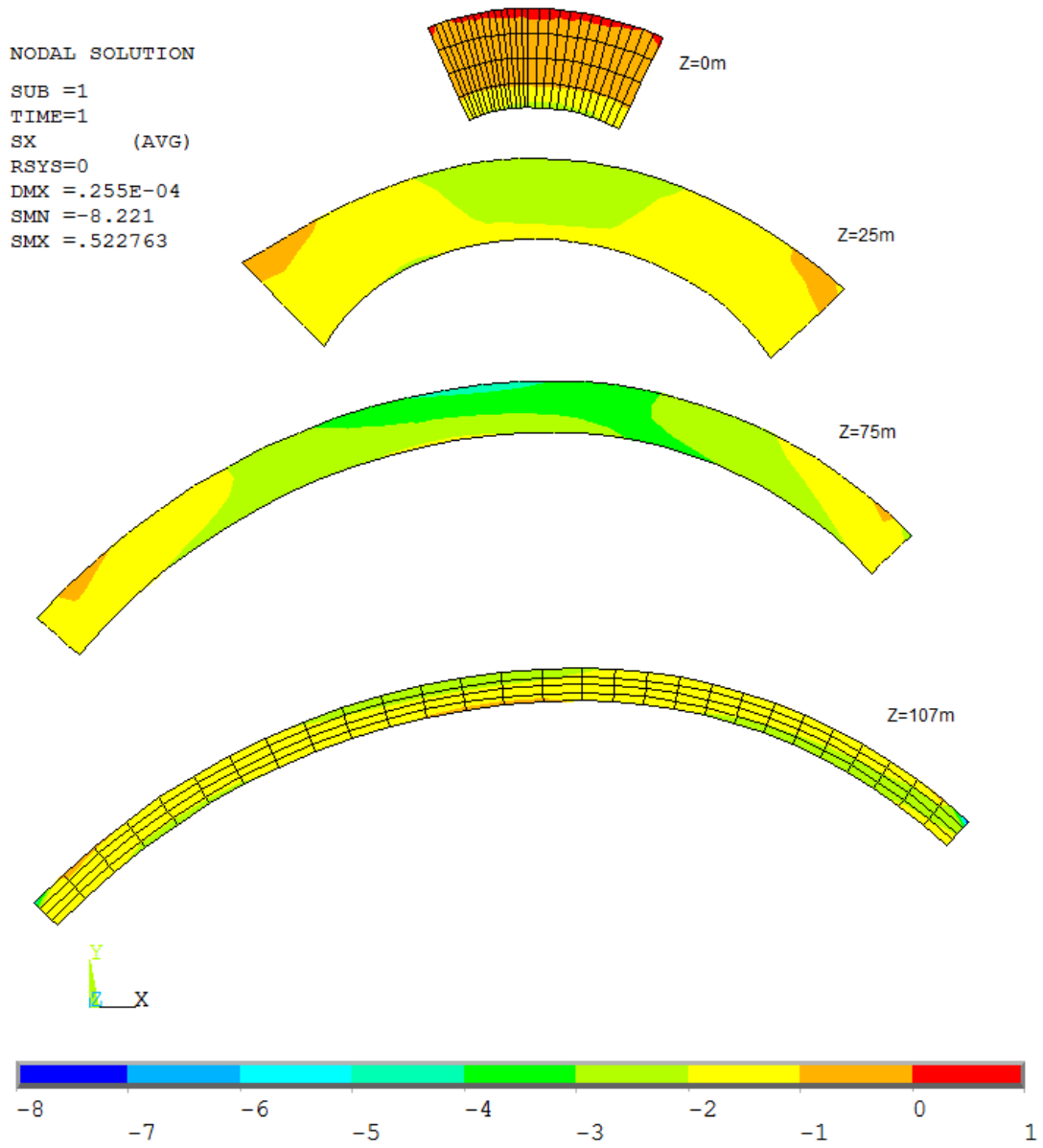
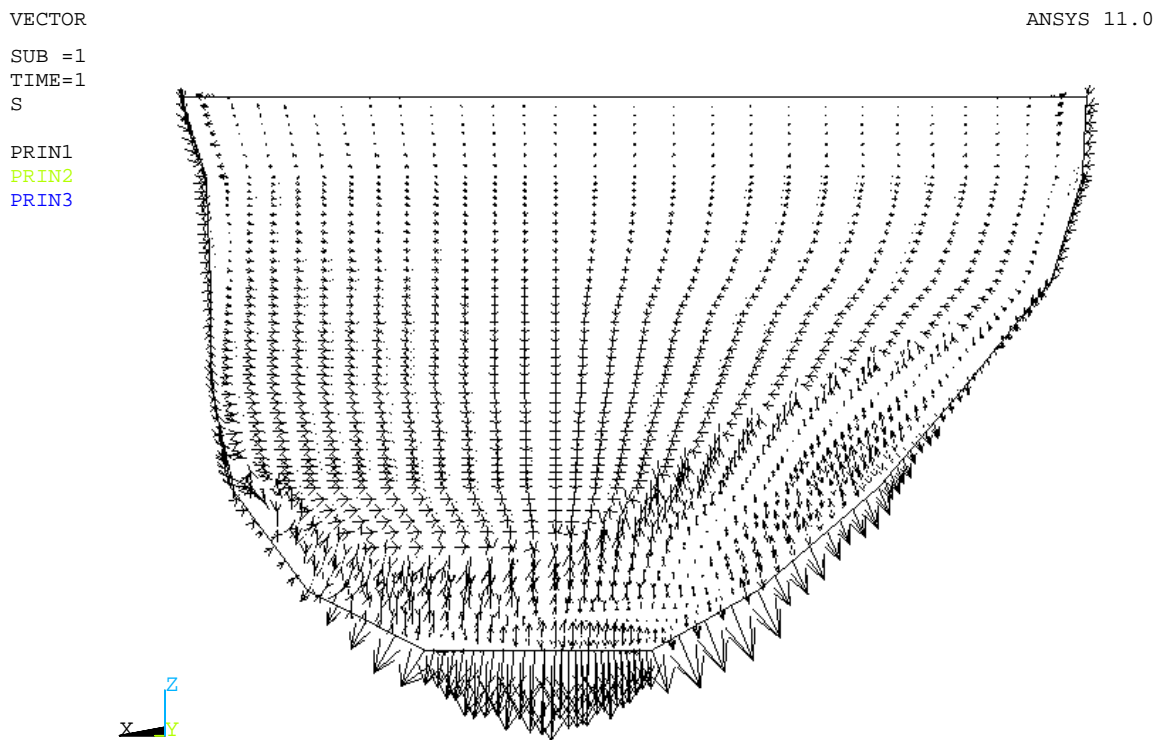
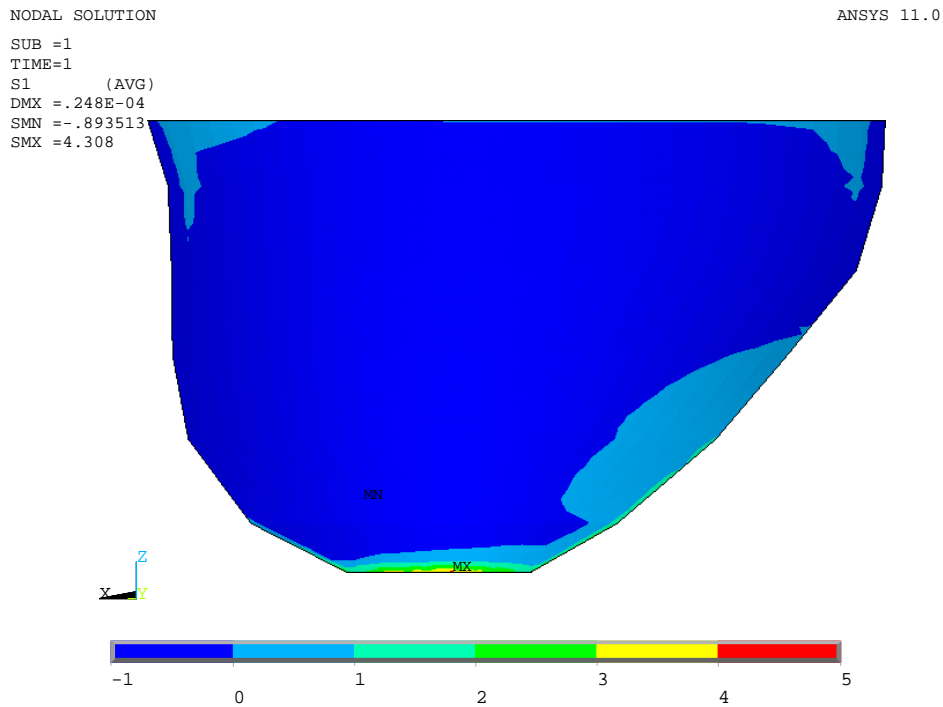


Figura 105 – Tensões (σ_x) ao longo dos arcos para diversas cotas (Mpa)



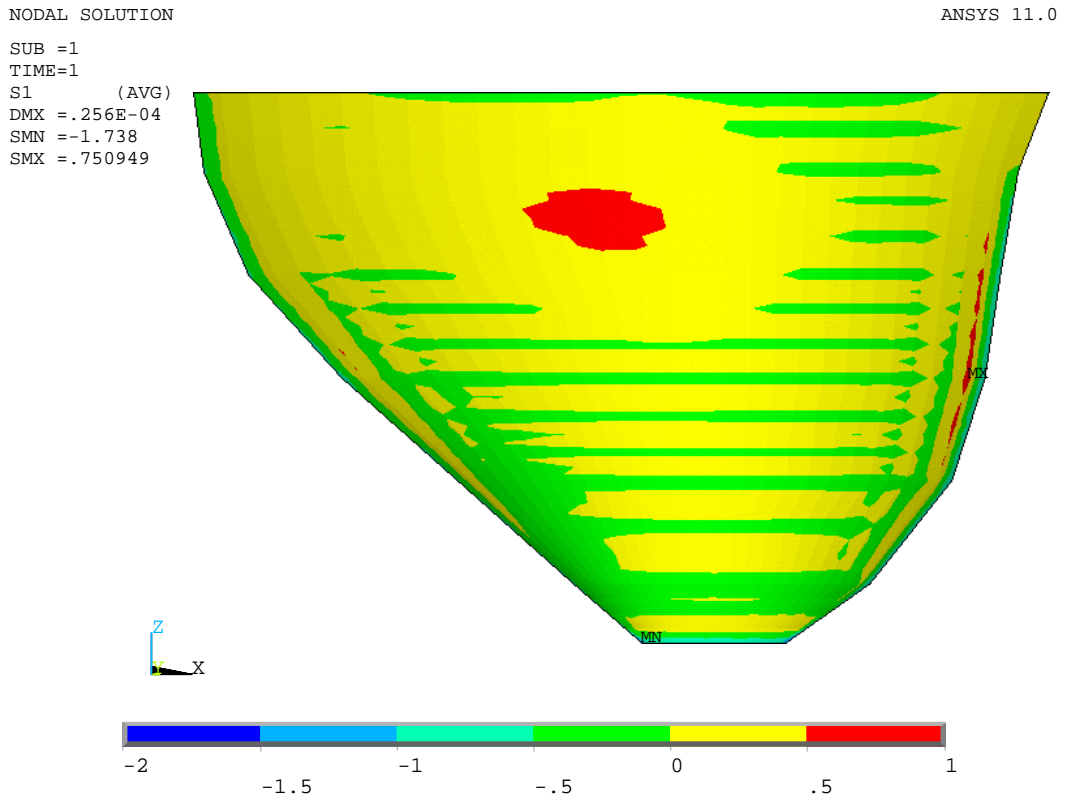


Figura 108 – Tensões principais máximas no paramento de jusante (Mpa)

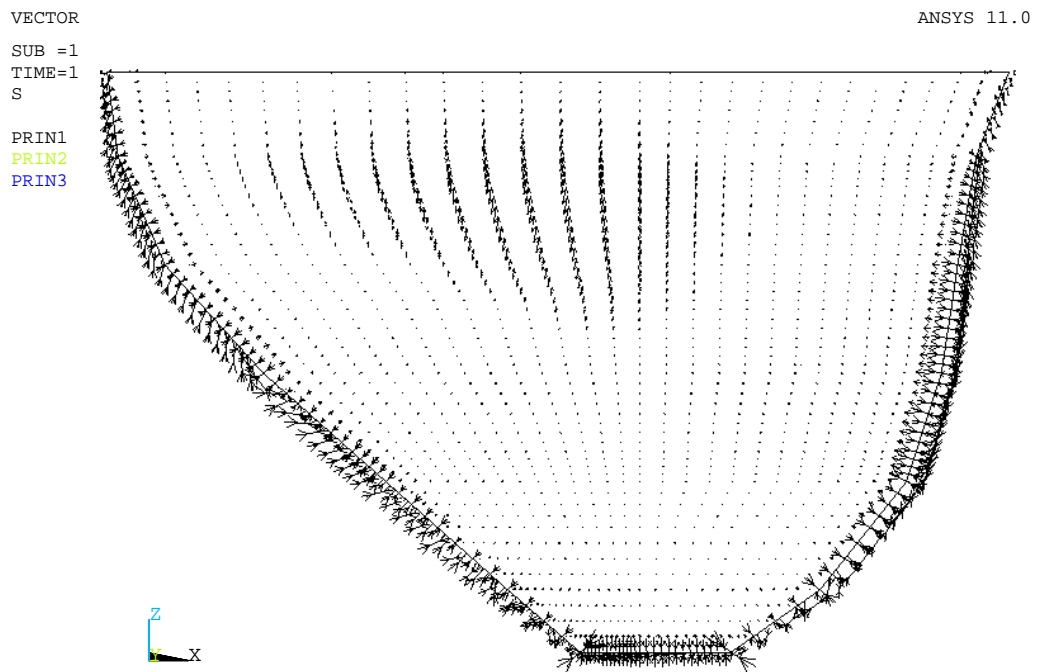


Figura 109 – Direcção das tensões principais máximas no paramento de jusante

NODAL SOLUTION
SUB =1
TIME=1
S3 (AVG)
RSYS=0
DMX =.248E-04
SMN =-9.672
SMX =.187814

ANSYS 11.0

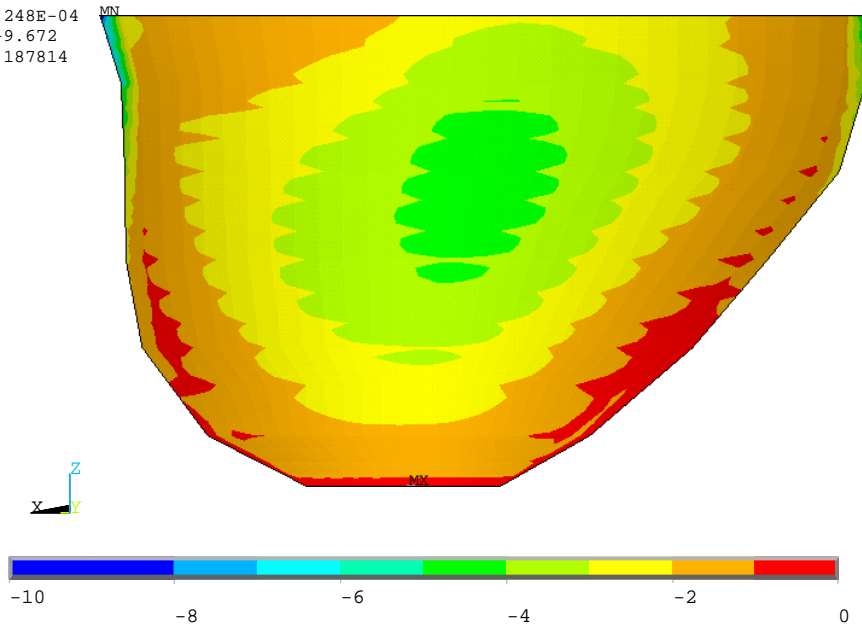


Figura 110 – Tensões principais mínimas no paramento de montante (Mpa)

VECTOR
SUB =1
TIME=1
S
PRIN1
PRIN2
PRIN3

ANSYS 11.0

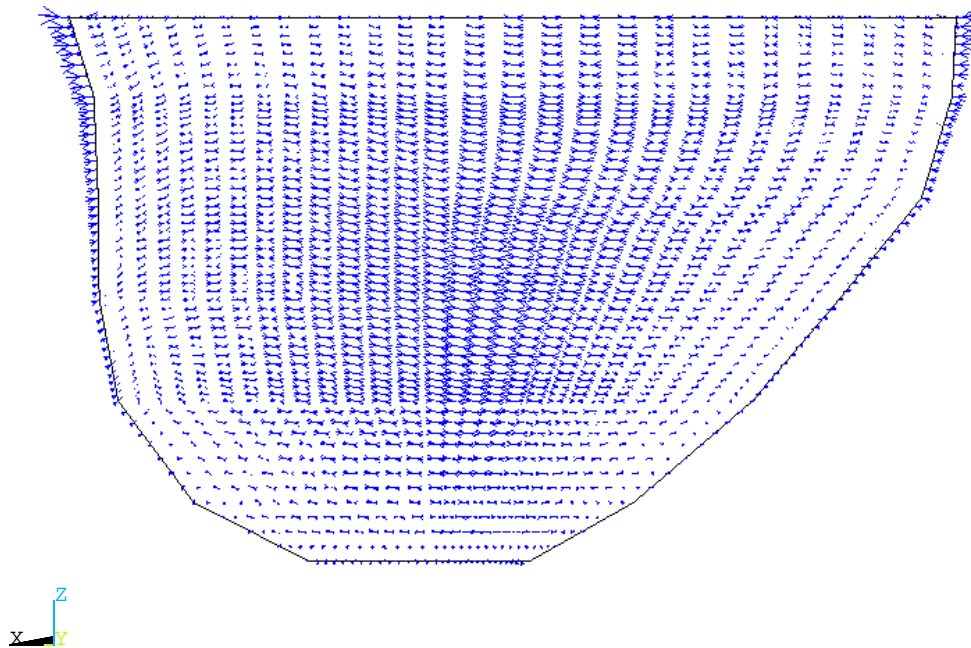


Figura 111 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de montante

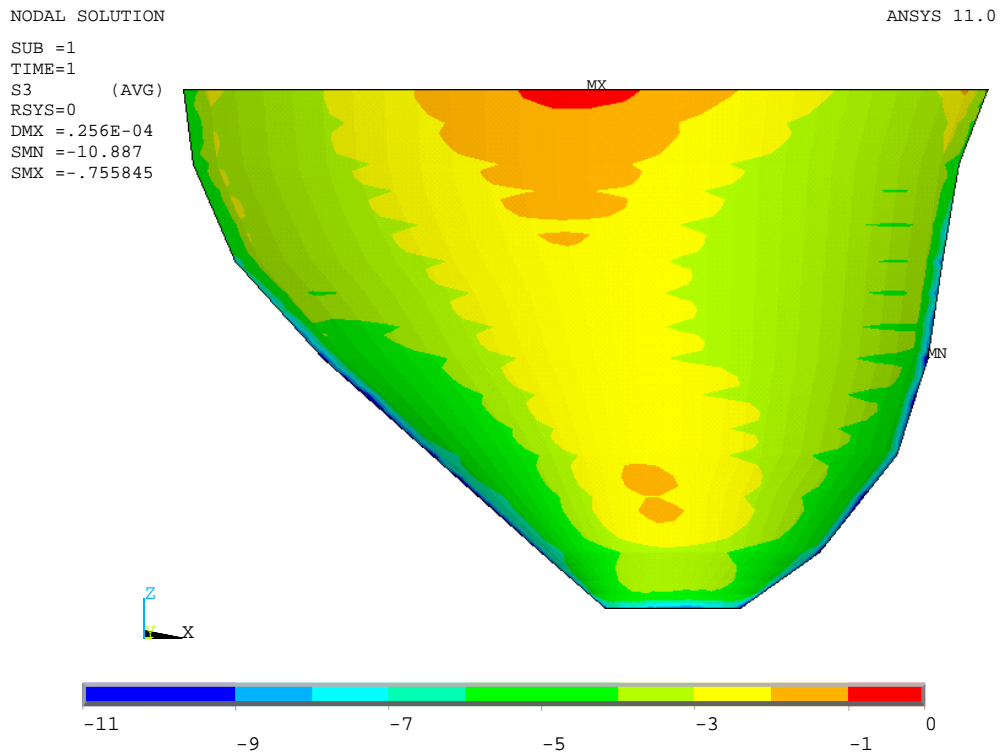


Figura 112 – Tensões principais mínimas no paramento de jusante (Mpa)

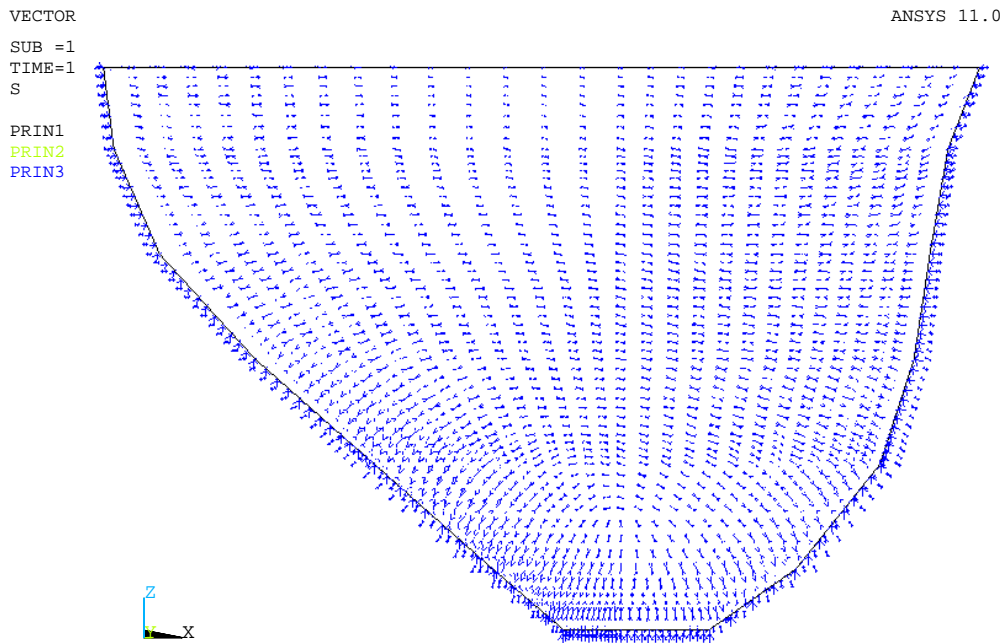


Figura 113 – Direcção das tensões principais mínimas no paramento de jusante