



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



ASPOF M Tiago Pereira Mateus

Análise de Algoritmos de Descompressão e Respetiva Adequação aos Perfis de Mergulho Habituais da Marinha Portuguesa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Marinha



Alfeite
2024



ESCOLA NAVAL



talant de bi-faire



ASPOF M Tiago Pereira Mateus

Análise de Algoritmos de Descompressão e Respetiva Adequação aos Perfis de Mergulho da Marinha Portuguesa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, com especialização em Marinha

Orientação de: CFR EN-MEC Suzana Silva Lampreia

Coorientação de: CFR M Zambujo Madeira

O Aluno Mestrando

O Orientador

ASPOF M Pereira Mateus

CFR EN-MEC Silva Lampreia

Alfeite

2024

“Do your own bit of saving, and if you drown, at least die knowing you were headed for
shore.”

Ray Bradbury

Agradecimentos

Nada deste trabalho seria possível sem o apoio daqueles a quem endereço os seguintes agradecimentos:

Ao meu Padrinho por me ter dado o mote para o meu percurso na Escola Naval.

Aos meus Pais e Irmã pelo apoio incondicional e orientação valiosa em todos os momentos.

À minha Orientadora, CFR EN-MEC Silva Lampreia, pela disponibilidade, conselhos e acompanhamento ao longo deste processo.

Ao meu Coorientador, CFR M Zambujo Madeira, por tudo aquilo que aprendi junto do Agrupamento de Mergulhadores.

Ao 2SAR U Silva Coelho, pelo apoio inestimável que tanto contribuiu para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Agrupamento de Mergulhadores e, em especial, ao CTEN M Violante da Luz, 1TEN M Pais Berardinelli e 1TEN M Areias Ferreira, cujos contributos ajudaram a fundamentar toda a base de estudo.

E, por fim, os meus grandes amigos Pina, Mike, Baptista, Castro, Nicau, Marques e, em especial, à Sofia, que tanto me apoiaram e contribuíram para a minha formação como militar e como pessoa.

RESUMO

A doença descompressiva afigura-se como um dos maiores problemas no mergulho. Com consequências tão graves como a morte ou uma perda da capacidade motora e cognitiva. O correto e atualizado estudo e acompanhamento das formas de prevenção e tratamento deste problema é crucial para qualquer mergulhador, esteja ele num ambiente recreativo, técnico ou militar.

A prevenção da Doença Descompressiva começa muito antes do mergulho em si. O correto planeamento do mergulho é também essencial para manter níveis de segurança adequados, especialmente quando se praticam mergulhos com uma complexidade maior e, conseqüentemente, um risco maior. Este planeamento passa por estabelecer patamares de descompressão, tempos de fundo máximos, profundidades máximas, misturas respiratórias adequadas, entre outras.

A ferramenta utilizada para a criação do planeamento é também de extrema relevância. Aqui entram em causa os algoritmos de descompressão e respetivas teorias que os fundamentam. Derivado do método de construção e dos fundamentos que utilizem, diferentes algoritmos sujeitarão mergulhadores a diferentes níveis de risco ou conservadorismo pelo que a escolha do algoritmo mais adequado será importante.

O objetivo deste estudo centra-se, portanto, em determinar qual o algoritmo mais adequado para a prática de mergulho dentro do espetro de operações dos mergulhadores da Marinha Portuguesa.

O método de estudo baseou-se profundamente na utilização da aplicação “*Subsurface*” onde são integrados os dados do perfil de mergulho e do perfil de descompressão pretendido e, posteriormente, retirados os resultados.

Com o presente estudo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido por Bühlmann, com o conservadorismo em estudo, é o mais conservador, mas também o mais lento, o algoritmo da *United States Navy* tem o menor tempo de descompressão associado e, conseqüentemente, o maior risco de desenvolvimento de Doença Descompressiva e o algoritmo *Defence and Civil Institute of Environmental Medicine* oferece um compromisso entre o conservadorismo de Bühlmann e o tempo de descompressão da *United States Navy*.

[ALGORITMO DE DESCOMPRESSÃO–DOENÇA DESCOMPRESSIVA–MARINHA PORTUGUESA–
MERGULHO–PERFIL DE MERGULHO]

ABSTRACT

Decompression Sickness is now one of the major problems concerning diving. With consequences as severe as death or a loss of motor or cognitive capacity, the correct and up to date follow up of prevention and treatment methods for this problem is crucial for any diver, be it in a recreative, technical or military environment.

Decompression Sickness prevention starts long before the dive takes place. The correct dive planning is also essential to maintain adequate safety levels, especially when a more complex and consequently riskier dive is practiced. This planning consists of establishing decompression stops, maximum bottom times, maximum depths, adequate respiratory mixtures, among others.

The tool used for the creation of the plan is also of extreme relevance. This is where decompression algorithms and its respective decompression theories are concerned. Deriving from the method of construction and the base theory they use, different algorithms will subject divers to different levels of risk and conservatism, therefore the choice of the most adequate algorithm will be important.

The objective of the present research aims to determine which algorithm best suits the diving practices of the Portuguese Navy inside its spectrum of operations.

The research method is heavily based in the open-source application "*Subsurface*" where all dive profile and decompression schedule data are integrated, and the results taken from afterwards.

With this research, it is concluded that the algorithm designed by Bühlmann is the most conservative, when using the level of safety observed in this study, but also the slowest in terms of decompression. The United States Navy algorithm has the lesser decompression time associated and consequently the biggest risk of Decompression Sickness developing. The Defence and Civil Institute of Environmental Medicine algorithm offers a compromise between the Bühlmann conservatism and the United States Navy decompression time.

[DECOMPRESSION ALGORITHM–DECOMPRESSION SICKNESS–DIVING–DIVE PROFILE–
PORTUGUESE NAVY]

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS DE ESTUDO	3
1.3. METODOLOGIA DO ESTUDO	4
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. ESTADO DA ARTE.....	7
2.1. O MERGULHO.....	7
2.1.1. CONFIGURAÇÕES DE EQUIPAMENTO	8
2.1.2. FÍSICA DO MERGULHO	9
2.1.3. A DIFUSÃO DOS GASES.....	11
2.1.4. A ABSORÇÃO DE GASES NOS LÍQUIDOS.....	12
2.1.5. A EQUALIZAÇÃO	13
2.2. A DESCOMPRESSÃO.....	14
2.2.1. A TEORIA DA DESCOMPRESSÃO	14
2.2.2. SATURAÇÃO E HALF TIMES.....	16
2.2.3. VELOCIDADE DE SUBIDA.....	17
2.2.4. LIMITES NÃO DESCOMPRESSIVOS	17
2.2.5. M-VALUES.....	18
2.2.6. OUTRAS MISTURAS DE GASES.....	18
2.2.7. TOXICIDADE DO OXIGÉNIO E HIPOXIA.....	19
2.2.8. EQUIVALENT AIR DEPTH	20
2.3. ALGORITMOS DE DESCOMPRESSÃO	22
2.3.1. BUBBLE MODELS	24
2.3.2. DEEP STOPS	24
2.3.3. GRADIENT FACTORS	25
3. ALGORITMOS DE DESCOMPRESSÃO	29
3.1. DCIEM 1983.....	29
3.2. BÜHLMANN ZHL-16	30
3.3. US NAVY.....	33
4. ANÁLISE DE PERFIS DE MERGULHO COM BASE EM ENTREVISTAS	37
4.1. MERGULHO QUADRADO.....	37
4.2. DESTACAMENTO DE MERGULHADORES SAPADORES 1	38
4.3. DESTACAMENTO DE MERGULHADORES SAPADORES 2	42
4.4. DESTACAMENTO DE MERGULHADORES SAPADORES 3	46

5. ANÁLISE DOS PERFIS DE MERGULHO COM BASE NO MAPA DE TECIDOS	51
5.1. MAPA DE TECIDOS.....	51
5.2. DESTACAMENTO DE MERGULHADORES SAPADORES 1 E 3	52
5.3. DESTACAMENTO DE MERGULHADORES SAPADORES 2	55
6. INTEGRAÇÃO DE DADOS	61
6.1. INTEGRAÇÃO DOS PERFIS DE MERGULHO COM OS ALGORITMOS.....	61
6.2. ANÁLISE DE RESULTADOS	74
7. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA.....	77
7.1. CONCLUSÕES	77
7.2. INVESTIGAÇÃO FUTURA	78
BIBLIOGRAFIA	81
GLOSSÁRIO.....	83
APÊNDICE – TABELA DE RESULTADOS DA INTEGRAÇÃO	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Histograma do número de artigos no Google Scholar	2
Figura 2-Metodologia do Estudo.....	4
Figura 3-Half times adaptado de http://www.dive-tech.co.uk/half%20times.htm	16
Figura 4-Gradient Factors, adaptado de Powell,2014	26
Figura 5-Perfil de Descompressão adaptado de Powell, 2014	27
Figura 6-Limites para o mergulho com ar adaptado de Department of National Defense of Canada, 2016	30
Figura 7-Mergulho quadrado	38
Figura 8-Mapa de tecidos.....	52
Figura 9-Perfil de Mergulho A1	52
Figura 10-Perfil de Mergulho B1	53
Figura 11-Perfil de Mergulho C1	54
Figura 12-Perfil de Mergulho A2	55
Figura 13-Perfil de Mergulho B2	56
Figura 14-Perfil de Mergulho C2	57
Figura 15-Perfil de Mergulho D2.....	58
Figura 16-Perfil de Mergulho E2	59
Figura 17-Algoritmos Aplicados ao Perfil A1.....	61
Figura 18-B1 Bühlmann.....	62
Figura 19-B1 DCIEM	62
Figura 20-B1 USNAVY.....	63
Figura 21-C1 Bühlmann.....	64
Figura 22-C1 DCIEM	64
Figura 23-C1 USNAVY.....	65
Figura 24-B2 Bühlmann.....	66
Figura 25-B2 DCIEM	67
Figura 26-B2 USNAVY.....	67
Figura 27-C2 Bühlmann.....	68
Figura 28-C2 DCIEM	69
Figura 29-C2 USNAVY.....	69
Figura 30-D2 Bühlmann.....	70

Figura 31-D2 DCIEM	70
Figura 32-D2 USNAVY.....	71
Figura 33-E2 Bühlmann	72
Figura 34-Mapa de Tecidos E2 Bühlmann GF 40/77	72
Figura 35-E2 DCIEM.....	73
Figura 36-E2 USNAVY	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Half times	17
Tabela 2-Compartimentos Limitantes.....	32
Tabela 3-Compartimentos Limitantes US Navy	34
Tabela 4-Perfis de mergulho DMS 1.....	41
Tabela 5-EAD DMS1	42
Tabela 6-Perfis de mergulho DMS 2.....	44
Tabela 7-Relação Profundidades-mistura	46
Tabela 8-EAD perfis DMS2	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC	Antes de Cristo
BCD	Dispositivo Compensador de Flutuabilidade (<i>Buoyancy Compensator Device</i>)
CAF	Forças Armadas Canadianas (<i>Canadian Armed Forces</i>)
CCR	Sistema de Circuito Fechado (<i>Closed Circuit Rebreather</i>)
CCUBA	Aparelho de Respiração Subaquática Semifechado (<i>Closed Circuit Underwater Breathing Apparatus</i>)
DCIEM	Instituto de Medicina Ambiental Civil e da Defesa (<i>Defence and Civil Institute of Environmental Medicine</i>)
DD	Doença Descompressiva
DMS	Destacamento de Mergulhadores Sapadores
EAD	Profundidade Equivalente em Ar (<i>Equivalent Air Depth</i>)
EAN	Ar Enriquecido Nitrox (<i>Enriched Air Nitrox</i>)
FSW	Pés de Água Salgada (<i>Feet of Sea Water</i>)
GF	Fator de Gradiente (<i>Gradient Factor</i>)
IEE	Inativação de Engenhos Explosivos
LND	Limites Não Descompressivos
MCM	Medidas Anti Mina (<i>Mine Counter Measures</i>)
MPTT	Máxima Tensão Admissível dos Tecidos (<i>Maximum Permissible Tissue Tension</i>)
MSW	Metros de Água Salgada (<i>Meters of Sea Water</i>)
NATO	Organização do Tratado do Atlântico Norte (<i>North Atlantic Treaty Organization</i>)
OC	Circuito Aberto (<i>Open Circuit</i>)
SCR	Sistema de Circuito Semifechado (<i>Semi Closed Rebreather</i>)
SCUBA	Aparelho de Respiração Subaquática Autónomo (<i>Self Contained Underwater Breathing Apparatus</i>)
SNC	Sistema Nervoso Central
SLM	Litros Standard por Minuto (Standard Liters per Minute)
VVAL	Valor de Variável Permitido (<i>Variable Value Allowed</i>)

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

O mergulho surge de uma atração inata que o Homem sempre teve pelo mar. Em 332 AC (antes de Cristo) já Aristóteles descrevia de que forma Alexandre, o Grande terá usado o sino de mergulho para observações subaquáticas e operações militares (Djozic, 2022). Com a evolução da tecnologia do mergulho descobriram-se também os perigos associados, especialmente aqueles relativos à respiração de ar sob pressão. Entre eles está a doença descompressiva (DD). (Powell, 2014)

A DD surge como um problema muito antes de se concretizar o mergulho como hoje é conhecido. Foi Robert Boyle, o responsável pela Lei de Boyle, quem pela primeira vez descreveu aquilo que se viria a chamar DD em 1667, quando observou o comportamento de uma serpente sujeita a uma redução significativa da pressão ambiente. No entanto, as notas de Boyle não receberam a devida atenção até ao início do século XIX quando começaram a ser relatados incidentes de trabalhadores em construções de pontes que sentiam dores nas articulações quando saíam da sua zona de trabalho, a base dos pilares das pontes. Estes trabalhadores eram conhecidos como os "*Caissons*" (do francês, caixa) que mais tarde vieram a dar nome ao mal que sofriam "*Caisson's disease*" e que ainda hoje é utilizado como um termo sinónimo para a DD, assim como "*Bends*". (Powell, 2014)

Os algoritmos de descompressão surgem no seguimento das teorias da descompressão como uma forma de simular matematicamente o comportamento fisiológico humano e as propriedades físicas dos gases e desta forma permitir um controlo relativamente seguro do risco a que um mergulhador se submete durante o mergulho. (Angelini, 2018)

No ambiente militar o mergulho acarreta maiores riscos devido à natureza dos seus trabalhos, onde é comum trabalhar de perto com explosivos ou com ambientes pouco permissivos ao mergulho. Assim, é imperativo que todos os instrumentos e equipamentos utilizados sejam tão fidedignos quanto possível por forma a que o

mergulhador se possa focar na tarefa sem se preocupar com outros perigos inerentes ao mergulho. Por outro lado, também não há interesse em que o equipamento seja demasiado conservador e limite em demasia o mergulho, obrigando o militar a tomar procedimentos desnecessários e possivelmente excessivos, tais como patamares descompressivos mais longos ou mergulhos mais curtos, sendo assim de extrema importância encontrar o ponto de equilíbrio entre um algoritmo seguro, mas que não seja demasiado conservador.

É desta forma visível a relevância do tema para a Marinha Portuguesa e, por consequente, os mergulhadores pertencentes a esta. A pertinência noutros âmbitos pode também ser observada através do número de artigos existentes. Se se recorrer a ferramentas como o *Google Scholar*, por exemplo, e introduzirmos palavras-chave como *Diving* (Mergulho) retiram-se cerca de 944 000 resultados, *Decompression Theory* (Teoria de Descompressão) obtêm-se cerca de 151 000 resultados, se se passar a *Decompression Sickness* (Doença Descompressiva) obtêm-se 52 400 resultados, existem 35 500 entradas para *Diving Decompression* (Descompressão no mergulho) e apenas 10 000 para *Diving Decompression Algorithm* (Algoritmos de Descompressão no mergulho).

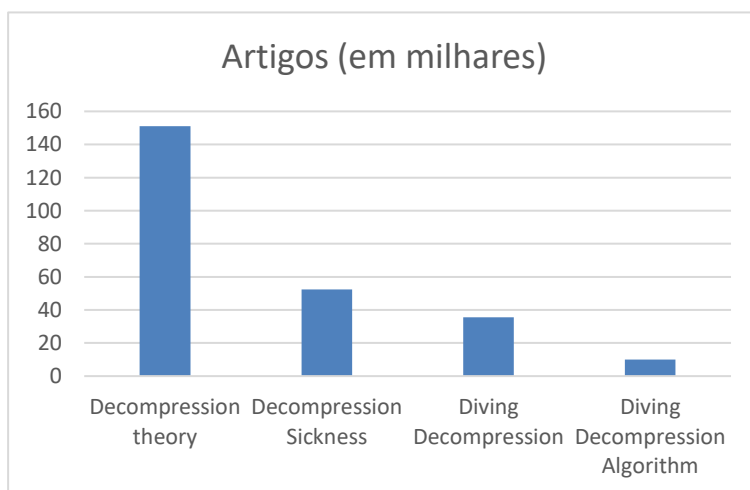


Figura 1-Histograma do número de artigos no Google Scholar

1.2. Objetivos de Estudo

A presente dissertação tem por principal objetivo investigar a relação entre os algoritmos de descompressão utilizados pelos mergulhadores da Marinha Portuguesa e os perfis de mergulho dos mesmos, aferindo de que modo se adequam à tipologia de missões e tarefas em que são empenhados. De onde surge a questão central:

Os Algoritmos de Descompressão utilizados atualmente são adequados aos perfis de mergulho executados pelos mergulhadores da Marinha Portuguesa?

De onde surgem as seguintes questões derivadas:

- Quais os perfis de mergulho da Marinha Portuguesa?
- De que modo se podem agrupar os perfis de mergulho de modo a obter um completo, mas limitado número de perfis?
- Quais os algoritmos de descompressão utilizados pela Marinha Portuguesa?
- Quais os pressupostos e limitações de trabalho destes algoritmos?
- Os algoritmos utilizados atualmente são adequados ao tipo de mergulho praticado?
- Que algoritmo, ou algoritmos, melhor se adequam tendo em conta os perfis determinados?

O presente estudo foca-se na Marinha Portuguesa pelo que a informação relativa aos perfis de mergulho e de descompressão provém de várias unidades deste ramo. No entanto, recorre a elementos de outras Forças Armadas como as CAF (Canadian Armed Forces), uma vez que existe muita doutrina que foi adaptada à Marinha Portuguesa a partir destas.

Tendo por objetivo averiguar a adequação de algoritmos de descompressão aos perfis de mergulho, a presente investigação tem em conta fatores como os *Gradient Factors* utilizados, a teoria de descompressão em que se baseia, grau de conservadorismo e outros.

Por razões de limitação de estudo e da área científica em exploração, esta dissertação não tem em conta fatores fisiológicos próprios de cada mergulhador tais como a temperatura do corpo, a idade, a hidratação ou outros, não sendo, por isso, desenvolvido o estudo do efeito provocado no corpo pela utilização de um ou outro algoritmo ou teoria de descompressão. Pela mesma razão não serão abrangidos por este estudo mergulhos com recurso a misturas de gases respiráveis que incluam como elementos principais outros que não azoto e oxigénio.

Existe um número significativo de algoritmos de descompressão pelo que se torna necessário também limitar este fator. Desta forma foram escolhidos três que mais familiaridade apresentam aos mergulhadores da Marinha Portuguesa, devido à sua aplicação nos vários modos de emprego dos elementos desta unidade e ainda tendo em conta a teoria que utilizam como fundamento da sua construção.

1.3. Metodologia do Estudo

A presente dissertação baseia-se, para o seu desenvolvimento, numa série de fases sequenciais ilustrada na figura abaixo:

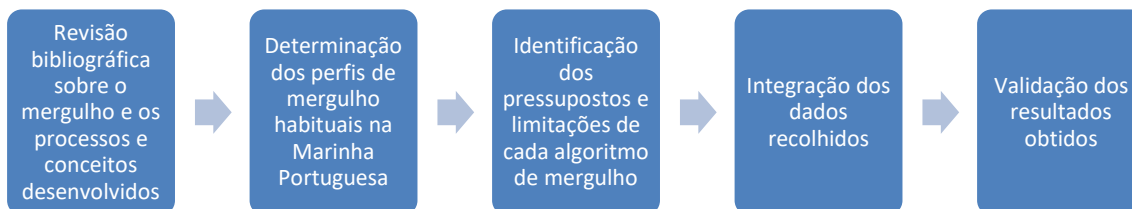


Figura 2-Metodologia do Estudo

Inicialmente, efetuou-se um estudo com base em artigos, publicações e livros tendo por objetivo reunir e explicar todos os fenómenos que se dão dentro da esfera do mergulho. Nesta primeira fase engloba-se o comportamento e interação entre a água e os gases e os vários processos físicos associados a volumes de gases submergidos. Depois a forma como estes se comportam no corpo humano sujeito a uma pressão ambiente superior à “normal”, com uma passagem breve pelas várias

teorias que existem relativas à descompressão. Por fim uma abordagem à utilização e modo de funcionamento de algoritmos de descompressão.

Numa segunda fase foram realizadas entrevistas exploratórias com os vários destacamentos de mergulhadores, individualmente, com o objetivo de determinar os perfis de mergulho habituais ou típicos destes. Foi entrevistado um oficial de cada Destacamento de Mergulhadores Sapadores (DMS). Além do objetivo principal destas entrevistas foi também aferido o equipamento utilizado, a misturas de gases utilizada e ainda as preocupações e limitações que cada tipo de mergulho apresenta.

A terceira fase de desenvolvimento da dissertação envolve o estudo aprofundado dos algoritmos e tabelas de descompressão através de publicações, manuais e tabelas de descompressão associadas a cada algoritmo.

Concluída a recolha de informação inicia-se a fase de cruzar os dados obtidos por forma a poder efetuar uma avaliação detalhada da adequação entre os algoritmos e os perfis utilizados. Aqui recorreu-se à aplicação *open source*, “*Subsurface*”, para determinar a viabilidade de utilização de cada algoritmo em cada perfil.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por sete capítulos.

O primeiro capítulo é composto por uma breve introdução ao tema e a motivação do estudo, além da metodologia que se pretende utilizar e a estrutura do mesmo.

O segundo capítulo apresenta os vários conceitos base necessários à compressão das implicações do mergulho. Aborda o funcionamento geral do equipamento utilizado e também a forma como o corpo reage quando exposto ao meio subaquático e ainda de que forma se pode ter um controlo dos processos do corpo através dos algoritmos de descompressão.

O terceiro capítulo pretende explicitar qual o modo de funcionamento, pressupostos e limitações dos vários algoritmos de mergulho utilizados e passíveis de ser utilizados pela Marinha Portuguesa.

O quarto capítulo é construído com base em três entrevistas realizadas aos três destacamentos de mergulhadores da Marinha Portuguesa. Este capítulo define os perfis de mergulho mais comuns utilizados por este ramo das forças armadas.

No quinto capítulo é efetuada uma análise aos perfis determinados no capítulo anterior através do mapa de tecidos da aplicação "*Subsurface*".

No sexto capítulo é exercida a integração dos dados, onde são aplicados os perfis de descompressão definidos por cada algoritmo a cada perfil de mergulho.

O sétimo e último capítulo sumariza as conclusões retiradas do estudo e desenvolve propostas de estudos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. O Mergulho

O ser humano evoluiu no meio terrestre, desta forma adaptando-se às condições do mesmo. Surge, no entanto, ao longo da história humana um fascínio pelo mundo aquático. Este interesse incitou o Homem a procurar conhecer mais sobre o meio com o intuito de poder ir mais longe e mais fundo. (Djozic, 2022)

O primeiro e mais evidente fator limitativo do mergulho é o facto de o ser humano não conseguir respirar (sem a ajuda de fatores externos ao corpo) quando submerso. É, portanto, obrigado a recorrer a um equipamento que permita esta ação, desta forma surge o equipamento SCUBA (*Self Contained Underwater Breathing Apparatus*) criado em 1949 por Cousteau e Gagnan (Paris, França Patente Nº 2485039, 1949). Cada equipamento engloba três partes fundamentais, são elas (PADI, 2015):

- BCD (*Buoyancy Compensator Device*), que permite ao mergulhador o controlo da flutuabilidade através da introdução ou remoção de ar de um compartimento;
- Regulador, que fornece ao mergulhador o ar respirável à pressão circundante;
- Garrafa, um compartimento onde é armazenado o ar sob pressão a ser utilizado pelo mergulhador para respirar ou para alimentar o BCD.

Outro fator a ter em consideração é a compressão das vias aéreas e dos espaços vazios rodeados por paredes rígidas preenchidos por ar quando submersos como os seios perinasais. A representação mais clara deste feito é visível quando se mergulha uma garrafa ou um balão cheio de ar fechado. Basta atingir aproximadamente os 10 metros de profundidade para que seja notável a redução de volume do ar. Neste ponto o volume de ar deverá ter aproximadamente metade do volume à superfície. (PADI, 2015)

2.1.1. Configurações de equipamento

Conforme a necessidade e especificações do mergulho podem ser utilizados diferentes configurações de equipamento. Estas configurações consistem em circuitos abertos (OC), circuitos semifechados (SCR) e circuitos fechados (CCR).

Circuitos Abertos

O OC é o sistema mais simples que utiliza uma mistura respiratória fixa pré-feita antes do mergulho e que não se altera. Desta forma a pressão parcial de oxigénio ao longo do mergulho aumenta em função da profundidade. Com esta configuração a mistura após ser inspirada é libertada para o ambiente dando origem a bolhas, apesar da mistura exalada ainda conter oxigénio (cerca de 16%). Este é o equipamento utilizado mais frequentemente no mergulho recreativo. (Pim's Tekdiving, 2024)

Circuitos Semifechados

Os SCR têm um grau maior de complexidade e dividem-se em dois tipos em função do modelo de fornecimento da mistura respiratória entre *pré-mix* e *self-mix*. (Pim's Tekdiving, 2024)

Pré-mix utiliza misturas respiratórias feitas antes do início do mergulho durante o carregamento da garrafa utilizada. No ambiente militar são utilizadas misturas fixas seguindo a doutrina NATO (North Atlantic Treaty Organization) (NATO, 2020). A mistura é depois fornecida ao saco-pulmão por forma a manter as frações de gases definidas, tendo em conta a taxa de esforço do mergulhador. A pressão parcial de oxigénio irá, portanto, variar em função da mistura presente no saco-pulmão. (Pim's Tekdiving, 2024)

Self-mix por outro lado recorre a 2 garrafas, em que uma é carregada com oxigénio puro e a segunda com diluente. O diluente é uma mistura do gás inerte escolhido (azoto ou hélio). Este tipo de equipamento fornece um fluxo contínuo de oxigénio e um fluxo variável de diluente por forma a manter a pressão parcial de oxigénio entre 1,2 bar e 1,9 bar, o que em média corresponde a 1,6 bar no final do mergulho. (Pim's Tekdiving, 2024)

Circuitos Fechados

O CCR, assim como o SCR *self-mix*, também é constituído por 2 garrafas, uma com oxigénio e outra com diluente. No entanto, o diluente neste sistema é uma mistura respirável à máxima profundidade planeada. A garrafa de diluente fornece o saco-pulmão conforme a necessidade de manter a fração dos gases necessária e a garrafa de oxigénio repõe este gás no circuito respiratório em função do consumo metabólico do gás. No sistema em uso pela Marinha Portuguesa o sistema dispõe de um controlador eletrónico. Este controlador analisa a pressão parcial de oxigénio, dá ordem a uma electroválvula para repor oxigénio, mantém o *setpoint* definido pelo mergulhador e ainda atua como computador de mergulho em função da mistura e da pressão parcial de oxigénio lida. (JJ-CCR, 2024)

2.1.2. Física do mergulho

Existem três leis da física de grande relevância para o mergulho. São elas a lei de Boyle, lei de Dalton e Lei de Henry.

Lei de Boyle

A lei de Boyle defende que, se a temperatura se mantiver constante, o volume de gás irá variar inversamente com a pressão absoluta e a densidade diretamente com a mesma. (Department of National Defense of Canada, 1989)

$$PV = K \quad (1)$$

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (2)$$

Em que P_1 é a pressão inicial de um gás, P_2 a pressão final, V_1 o volume inicial e V_2 o volume final do mesmo gás. Assim com o aumento de profundidade e respetivo aumento de pressão, devido à coluna de água que se encontra acima do mergulhador, mais comprimido será qualquer gás armazenado naquela profundidade. A pressão pode ser calculada empiricamente de forma relativamente precisa da seguinte forma:

A cada 10 metros de profundidade soma-se 1 bar¹ e ao valor obtido soma-se ainda mais um bar para incluir o valor da pressão do ar à superfície, os valores intermédios podem ser interpolados. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Tome-se o seguinte exemplo: a 40 metros de profundidade teremos 4 mais 1 bar, ou seja, 5 bars em que 4 se devem à pressão exercida pela água e 1 pela atmosfera. Desta forma a densidade do ar também será 5 vezes maior do que à superfície pelo que, num OC, o consumo de ar também seja muito maior, reduzindo a autonomia do mergulho. Da mesma forma o volume também aumenta quando a profundidade reduz, o que é um perigo para o mergulho e uma das razões para não se efetuar apneia durante um mergulho com garrafa. Se os pulmões estiverem cheios a uma profundidade de 10 metros e o mergulhador subir até a superfície sem libertar ar, sofrerá um aumento do volume para além da capacidade de expansão visto que os pulmões expandirão para o dobro do volume aos 10 metros. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Lei de Dalton

Dalton estudou o comportamento de gases inertes e determinou que numa mistura destes gases a pressão total no volume em que estão contidos pode ser calculada como a soma das pressões parciais dos vários gases que compõem a mistura, da seguinte forma (U.S.NAVY, 2016):

$$Pp_1 + Pp_2 + Pp_3 = Pt \quad (3)$$

Com Pp_x a pressão parcial do gás x e Pt a pressão total da mistura de gases. O que permite determinar a quantidade de qualquer gás num determinado volume de mistura através do conhecimento da sua pressão parcial (U.S.NAVY, 2016).

A pressão parcial de um gás é proporcional ao número de moléculas desse gás num volume e temperatura dados. Se num volume se introduzir oxigénio puro (100%)

¹ O bar, com símbolo bar (do grego barys, significando "pesado"), é uma unidade de pressão e equivale a exatamente 100 000 Pascais. Este valor de pressão é muito próximo ao da pressão atmosférica padrão, que é definido como 101 325 Pa.

à pressão ambiente (1 bar) então a pressão no interior desse volume será de 1 bar, se posteriormente inserirmos um número igual de moléculas de azoto a pressão passará para 2 bar com 50% oxigénio e 50% azoto, ou seja, a pressão parcial de oxigénio passou para metade sem alterar a quantidade deste gás dentro do volume. A pressão parcial também altera caso haja variações da temperatura ou do volume. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Lei de Henry

A lei de Henry diz que a quantidade de gás dissolvido num líquido a uma determinada temperatura é quase diretamente proporcional à pressão parcial desse gás. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Quando um gás é exposto a um líquido, livre de qualquer gás, irá decorrer uma dissolução rápida do mesmo gás no líquido até que a pressão parcial do gás nesse líquido iguale a pressão parcial ambiente. A diferença entre as pressões parciais do gás no líquido e no ambiente apelida-se de “gradiente de pressão”. Este gradiente de pressão determina a velocidade a que o gás se irá dissolver no líquido. Gradientes elevados implicam uma dissolução rápida e vice-versa. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Tal como se aplica a um líquido também se aplica à saturação ou descompressão dos tecidos no corpo humano. Um gás que se encontre dissolvido nos tecidos permanecerá assim a menos que haja uma alteração da pressão ambiente. Daí a importância das tabelas e algoritmos de descompressão que permitem uma libertação do gás dissolvido gradualmente por forma a não favorecer o desenvolvimento de DD. (Department of National Defense of Canada, 1989)

2.1.3. A Difusão dos Gases

A difusão dos gases é o processo de mistura entre várias moléculas de gases diferentes. Devido ao facto de um gás se encontrar constante e perpetuamente em movimento, quaisquer dois gases acabarão por se misturar homogeneamente quando

em contacto. Pela mesma razão isto também acontece quando o gás está em contacto com um líquido, através da superfície do mesmo e ainda com certas membranas ou tecidos mais finos de vários tipos de materiais. (Department of National Defense of Canada, 1989)

A quantidade de gás que passará pela membrana depende do diferencial de pressão parcial desse gás dentro e fora da membrana, movimentando-se sempre do local de maior pressão para o de menor pressão, apesar de existirem movimentos nos dois sentidos. Quando a pressão parcial é igual nos dois locais a quantidade de movimento nos dois sentidos será igual, atingindo assim o equilíbrio mesmo existindo movimento. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Existem vários tecidos do corpo humano que funcionam como estas membranas, de onde se explica o processo de saturação dos tecidos. (Department of National Defense of Canada, 1989)

2.1.4. A Absorção de Gases nos Líquidos

Assim como na difusão dos gases, a absorção é bastante semelhante. Neste caso, no entanto, o ponto de equilíbrio é definido pela solubilidade do gás no líquido. Por outras palavras, é definido pela quantidade de moléculas de gás que podem ser dissolvidas no líquido a uma determinada pressão parcial. No ponto de equilíbrio o líquido contém o gás a uma tensão igual à pressão parcial desse gás na mistura a que o líquido está exposto. (Department of National Defense of Canada, 1989)

A solubilidade é uma característica própria de cada gás. Desta forma existem líquidos que são melhores solventes que outros. Tome-se por exemplo o caso do azoto que é cinco vezes mais solúvel em gordura do que na água. Existem ainda certas condições que afetam a quantidade de gás que poderá ser absorvida. As que mais se destacam neste aspeto são a temperatura e a pressão. Estes dois fatores são então de especial relevância para o mergulho, visto que um mergulhador é submetido sempre a pressões ambiente inabituais e, por vezes, a temperaturas extremas. (Department of National Defense of Canada, 1989)

2.1.5. A Equalização

Quando a pressão num espaço preenchido por gás no corpo é diferente da pressão circundante podem ocorrer lesões nos tecidos que limitam este espaço, às quais se dá o nome de barotrauma. Este fenómeno pode acontecer tanto quando a pressão circundante é maior, como quando é menor que a pressão no espaço. No corpo humano estes espaços são os ouvidos, os seios perinasais, os dentes (quando existem cavidades) e os pulmões. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Para evitar o barotrauma é necessário que se efetue a equalização destes espaços, que consiste simplesmente em igualar a pressão do espaço com a pressão circundante. Os dentes não têm uma forma de ser equalizados pelo que a única forma de evitar o problema será não ter cavidades nos dentes. Os pulmões, quando sofrem algum barotrauma, normalmente deve-se a uma expansão do ar já existente no espaço para além da capacidade do órgão, para evitar basta manter uma respiração normal evitando a apneia, especialmente durante a subida. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Os ouvidos, ao contrário dos restantes espaços, exigem especial atenção. O tímpano é uma membrana flexível que separa o ouvido médio do canal auditivo externo. Quando existe uma sobrepressão no ouvido médio o ar costuma sair pelas trompas de Eustáquio, no entanto, quando estas se encontram obstruídas devido a uma constipação, sinusite ou algo semelhante o ar fica acumulado dentro do ouvido médio o que pode causar uma distensão do tímpano, podendo mesmo levar à rutura do mesmo. Este é um fenómeno que costuma ocorrer durante a subida. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Durante a descida a pressão exterior aumenta pelo que será necessário equalizar a pressão no ouvido médio, caso contrário o tímpano será pressionado para o ouvido médio podendo levar à rutura também. Após a rutura a dor causada desaparece uma vez que a pressão é novamente igual nos dois espaços, no entanto, a entrada de água para o ouvido médio pode resultar em tonturas, desorientação e

vómitos. Para equalizar a pressão no ouvido médio é necessário introduzir ar através das trompas de Eustáquio. Pode realizar-se esta ação engolindo em seco ou pela movimentação do maxilar, mas para certas pessoas não é suficiente devido à fisionomia do ouvido pelo que é necessário executar a manobra de Valsalva que consiste em apertar o nariz e, com a boca fechada, expirar. Esta manobra não deve ser forçada no caso de não ter sucesso, visto que pode causar lesões no ouvido interno se a introdução de ar for demasiado violenta. (Department of National Defense of Canada, 1989)

2.2. A descompressão

Os tecidos, quando o ser humano respira ar sob pressão, absorvem azoto que fica dissolvido nos mesmos enquanto a pressão se mantiver, e é naturalmente expelido pela corrente sanguínea quando a pressão ambiente reduz, ou seja, quando inicia a subida até à superfície. Os mesmos tecidos, apesar de não serem diretamente afetados pela pressão exterior uma vez que são constituídos na sua maioria por água, estão ainda assim sujeitos a alguns perigos. (Becker & Parell, 2001)

2.2.1. A Teoria da Descompressão

John Scott Haldane é considerado o pai da teoria da descompressão moderna (Modern Decompression Theory). Derivado dos seus estudos propôs quatro princípios básicos (Powell, 2014):

- A absorção e eliminação de gases de um tecido ocorre exponencialmente;
- Tecidos diferentes absorvem e eliminam gases a diferentes velocidades;
- Descompressão acontece quando a pressão ambiente é reduzida;
- A razão da diferença de pressão entre o gás dissolvido num tecido e a pressão ambiente não deverá exceder 2.

As diferentes partes do corpo humano são alimentadas pelo sangue a diferentes velocidades conforme sejam mais ou menos irrigadas (perfusão). As partes

mais irrigadas são as que mais rapidamente podem saturar. Haldane, inicialmente, chamou a estas partes de “tecidos” (*tissues*), no entanto, o termo suscitava confusão uma vez que um “tecido” não correspondia diretamente a um tecido do corpo como o pulmão ou um músculo, daí adotar-se o termo “compartimento” para designar os tecidos que saturam ou comprimem com uma velocidade igual ou semelhante. (Powell, 2014)

Haldane sugere ainda que o corpo funciona como um grupo de tecidos que absorvem ou eliminam os gases a diferentes velocidades. Definiu 5 compartimentos diferentes com *half-times* de 5, 10, 20, 40 e 75 minutos (o conceito de *half-time* será abordado no capítulo seguinte). (Powell, 2014)

Mais tarde a U.S. Navy reviu as tabelas e retirou os compartimentos de 5 e 10 minutos quando chegaram à conclusão de que a saturação/descompressão destes podia ser sempre desprezada uma vez que nunca eram o fator limitativo da descompressão. Por volta da década de 50 do século XX voltaram a adicionar os mesmos compartimentos e ainda um outro de 120 minutos quando começaram a perceber a inadequação destes modelos para perfis de mergulho mais profundos e/ou mais longos. (Powell, 2014) (U.S.NAVY, 2016)

Até à década de 60 do século XX ainda se aplicava a teoria de Haldane com estas ligeiras modificações. Workman reviu a teoria de Haldane e adicionou outros 3 compartimentos de 160, 200 e 240 minutos. (Powell, 2014)

Bühlmann publicou em 1983 o livro “*Dekompression-Dekompressionskrankheit*” (Descompressão – Doença Descompressiva) mais tarde republicado com o título “*Tauchmedizin*” (Medicina do Mergulho) onde definiu 16 compartimentos e estabeleceu um novo algoritmo de descompressão. (Bühlmann, 1983) (Powell, 2014)

2.2.2. Saturação e Half Times

Todos os tecidos (ou compartimentos) reagem de igual forma à saturação, variando apenas a velocidade a que se dá esta dissolução dos gases. Este processo não é linear e segue um aspeto mais próximo de uma função logarítmica como é mostrado no gráfico abaixo (Dive-Tech, s.d.):

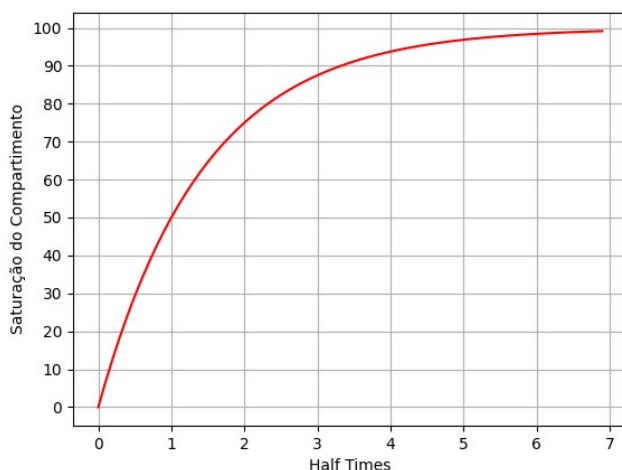


Figura 3-Half times adaptado de <http://www.dive-tech.co.uk/half%20times.htm>

O conceito adotado para a velocidade de saturação dos compartimentos, os *half times*, é já conhecido da ciência e aplicado noutras áreas sendo a mais conhecida no estudo de materiais nucleares. Na ciência nuclear *half time* indica o tempo que uma substância radioativa leva para se decompor até metade do seu tamanho original. (Dive-Tech, s.d.)

Aplicando este conceito ao mergulho, *half time* será o tempo necessário para que um compartimento fique 50% saturado. No entanto, os restantes 50% não levarão o mesmo tempo a saturar. Ao fim do tempo correspondente a dois *half times* o compartimento estará 75% saturado. A saturação ocorre de maneira que independentemente da percentagem do compartimento que ainda esteja por saturar levará sempre o mesmo tempo para saturar metade dessa percentagem. A seguinte tabela demonstra esta progressão (Dive-Tech, s.d.):

Tabela 1-Half times

Half Times	Saturação do Compartimento
1	50%
2	75%
3	87.5%
4	93.75%
5	96.88%
6	98.44%

A progressão nunca chegará aos 100%, dado que os passos se tornarão cada vez mais pequenos, no entanto, considera-se que um tecido está saturado a nível prático a partir do sexto *half time* visto que 98.44% já é bastante próximo de 100% e nas fases seguintes a percentagem aumenta relativamente pouco. (Dive-Tech, s.d.)

2.2.3. Velocidade de Subida

A velocidade de subida, ou melhor, o tempo de subida é um fator de extrema importância, uma vez que o corpo necessita de algum tempo para conseguir dissolver os gases inertes do corpo através da circulação. Se a velocidade de subida exceder a capacidade do corpo de expulsão destes gases é provável que se formem bolhas no sangue ou mesmo nos tecidos dando origem à DD. A formação e consequente expansão destas bolhas pode causar problemas graves como embolias (obstruções vasculares) em qualquer parte do corpo. (Becker & Parell, 2001)

2.2.4. Limites Não Descompressivos

A probabilidade de desenvolver a DD é reduzida quando são respeitados os Limites Não Descompressivos (LND). Os LND, ou *No Decompression Limits* em inglês, correspondem ao tempo máximo que um mergulhador pode permanecer a uma determinada profundidade sem necessitar de efetuar depois um patamar de descompressão, ou seja, possibilitando uma subida direta até à superfície. Caso seja ultrapassado um LND durante o mergulho devem ser efetuadas algumas paragens a profundidades específicas de modo a evitar o desenvolvimento de DD. (PADI, 2015)

2.2.5. M-Values

No decurso do estudo dos LND foram determinados os *M-values*. Foi Robert D. Workman o primeiro a utilizar este termo na década de 60 do século XX durante as investigações em torno da descompressão através da *U.S. Navy Experimental Diving Unit*. (U.S.NAVY, 2016) Por *M-value* entende-se o valor máximo de pressão absoluta que um tecido pode acumular a uma dada pressão sem apresentar sintomas de DD. (Baker, 1998)

Haldane em 1908 concluiu que o ser humano com os tecidos saturados a uma profundidade de 10 metros (em água salgada) conseguiria subir até à superfície sem sentir qualquer efeito negativo ou sintoma de DD, sendo este o limite sem sintomas. A 10 metros presencia-se uma pressão ambiente de 2 bar logo, Haldane concluiu que a diferença máxima entre a pressão ambiente e a pressão dos tecidos saturados seria de 2 bar, estabelecendo desta forma o primeiro *M-value*. Conforme os mergulhos se foram tornando mais profundos e mais longos apercebeu-se que este valor não era o mais correto pelo que mais tarde Workman aprofundou o estudo e corrigiu o valor de 2 bar para uma razão de 1,58:1 entre a pressão ambiente e a pressão parcial de gás dissolvido considerando apenas a pressão parcial do gás inerte no ar respirado (79%). Ainda no mesmo estudo Workman mostrou que os compartimentos com *half-times* mais rápidos também toleravam diferenças maiores de pressão que os compartimentos mais lentos e que estas “diferenças aceitáveis” reduzem com o aumento da profundidade. (Baker, 1998)

2.2.6. Outras Misturas de Gases

Uma solução, ou melhor, uma atenuante que permite a extensão dos LND será o uso de misturas com menor quantidade de gás inerte como EAN (*Enriched Air Nitrox*) 50 ou EAN 32, que contém 50 e 32% de Oxigénio (O_2) respetivamente, existindo ainda uma série de outras misturas possíveis. (U.S.NAVY, 2016)

Em OC a mistura é fixa uma vez que as frações de azoto (o gás inerte) e oxigénio na mistura se mantêm ao longo do mergulho. Em circuitos fechados ou

semifechados a mistura é feita no momento através da adição de oxigénio ou diluente para obter uma maior ou menor concentração de um gás com o objetivo de manter a pressão parcial do mesmo relativamente constante. (Department of National Defence of Canada, 2004)

Diminuindo a quantidade de gás inerte a ser difundido pela circulação estendem-se os LND permitindo mergulhos mais longos com um risco ainda reduzido de desenvolver a DD. Mesmo que se torne necessário realizar patamares de descompressão são mais curtos quando comparados a um mergulho com ar ($O_2 = 21\%$). No entanto, esta solução tem um problema associado. A toxicidade do oxigénio. (U.S.NAVY, 2016)

2.2.7. Toxicidade do Oxigénio e Hipoxia

O ser humano evoluiu e adaptou-se a uma percentagem relativamente fixa de oxigénio no ar, cerca de 21%. Quando sujeito a pressões parciais superiores o oxigénio torna-se tóxico, podendo mesmo levar à morte, sendo esta a razão de se usar ar no mergulho recreativo e não oxigénio puro (100%). Se a pressão parcial de oxigénio for demasiado baixa a pessoa sofrerá de hipoxia e morrerá também. (Department of National Defense of Canada, 1989)

Em mergulhos mais profundos torna-se até necessário reduzir a quantidade de oxigénio na mistura de forma a evitar a toxicidade do mesmo. Quanto mais prolongada for a exposição e quanto maior for a pressão parcial de oxigénio maior a toxicidade. Os pulmões e o sistema nervoso central (SNC) são os mais afetados pela toxicidade. (U.S.NAVY, 2016)

A nível pulmonar a exposição a pressões parciais de oxigénio superiores a meio bar acima da pressão atmosférica absoluta por períodos maiores que 90 minutos pode colapsar os alvéolos pulmonares e reduzir significativamente a capacidade respiratória. Este problema não é frequente no mergulho em geral, à exceção do mergulho de saturação onde a pressão parcial é, por vezes, mantida acima dos níveis de tolerância por períodos significativos. (Department of National Defense of Canada, 1989)

O sistema nervoso central é particularmente sensível a pressões parciais altas de oxigênio, uma vez que afeta diretamente o funcionamento das células no cérebro, os neurónios, que podem ficar sobrecarregados com oxigênio potenciando a ocorrência de convulsões (Department of National Defense of Canada, 1989). A toxicidade de oxigênio relativa ao SNC é influenciada por uma série de fatores como a suscetibilidade individual, a retenção de oxigênio, a profundidade, entre outros. Os sintomas passam principalmente por convulsões, no entanto, existem alguns sintomas menos graves que podem, ou não, surgir e alertar para o possível perigo como a redução da visão periférica, percepção de sons que não têm origem num estímulo externo, náuseas, espasmos de músculos das extremidades (dedos, lábios, face, etc...) e irritabilidade. O tratamento passa simplesmente por reduzir a profundidade ou reduzir a fração de oxigênio. (U.S.NAVY, 2016)

Hipoxia

O termo hipoxia refere-se a uma falha de recepção ou utilização de oxigênio suficiente pelos tecidos e órgãos do corpo, provocando assim o seu mau funcionamento ou mesmo a falência dos mesmos. Não deve ser confundido com anoxia, hipoxia significa pouco oxigênio, anoxia é a total ausência de oxigênio. (Department of National Defense of Canada, 1989)

A hipoxia causa, gradualmente, a paragem de funcionamento das células e eventualmente a morte. Tal como no caso da toxicidade, os neurónios são as células mais afetadas. Os primeiros sintomas são a perda de consciência e a morte causadas pelo insuficiente fornecimento de oxigênio ao cérebro. (Department of National Defense of Canada, 1989)

2.2.8. Equivalent Air Depth

Quando são utilizadas misturas respiratórias de oxigênio/azoto diferentes da mistura presente no ar, no contexto do presente estudo, a percentagem de azoto é significativamente inferior. Assim, segundo a lei de Henry a quantidade de azoto absorvida pelos tecidos será também consideravelmente inferior do que se o

mergulhador estivesse à mesma profundidade a respirar ar. As tabelas utilizadas para planejar a descompressão pressupõem uma percentagem de azoto na mistura respiratória de 79% pelo que os patamares de descompressão definidos serão desnecessariamente longos. (Department of National Defence of Canada, 2004)

A utilização de misturas com diferentes percentagens de azoto tem vantagens para a descompressão uma vez que a pressão parcial a dada profundidade será sempre menor que quando utilizada uma mistura de ar. Este recurso necessita ainda assim que sejam efetuados alguns cálculos por forma a determinar o perfil descompressivo necessário. (U.S.NAVY, 2016)

Assim passa a ser definida a *Equivalent Air Depth* (EAD) como a profundidade a que a pressão parcial de azoto numa mistura de ar seria a mesma que a pressão parcial efetiva de azoto na mistura respiratória utilizada pelo mergulhador àquela profundidade. (Department of National Defence of Canada, 2004)

Segundo a doutrina das Forças Armadas Canadianas, adotadas por Portugal, a fórmula para a determinação da EAD é a seguinte (Department of National Defence of Canada, 2004):

$$EAD = \frac{N_2\% \times (D_m + 10)}{79} - 10 \quad (4)$$

Em que:

- $N_2\%$ é a percentagem de azoto na mistura respiratória;
- D_m é a profundidade em msw (*meters of sea water*).

A fórmula utilizada pela US Navy é a seguinte (U.S.NAVY, 2016):

$$EAD = \frac{(1 - O_2\%) \times (D + 33)}{0.79} - 33 \quad (5)$$

Em que:

- D é a profundidade em fsw (*feet of sea water*, 33 fsw = 10 msw = 1 bar);

- $O_2\%$ é a percentagem de oxigénio na mistura;

Ou:

$$EAD = \frac{(1-O_2\%) \times (m+10)}{0.79} - 10 \quad (6)$$

Em que:

- m é a profundidade em msw;
- $O_2\%$ é a percentagem de oxigénio na mistura.

A EAD será sempre uma profundidade menor que a praticada no mergulho que utiliza EAN, daí a vantagem da utilização destas misturas (U.S.NAVY, 2016). Ainda assim os valores de EAD não poderão ser nunca menores que zero, tratando-se, estes casos, de limitações da fórmula utilizada. Nos casos em que tal acontece assume-se a EAD como sendo 0 metros, a superfície do mar ou, se se pretender uma perspetiva de descompressão é convencionado arredondar este valor para a primeira entrada (mais profunda) da tabela de descompressão. (Department of National Defence of Canada, 2004)

2.3. Algoritmos de descompressão

Os algoritmos de descompressão são, no fundo, um aglomerado de processos matemáticos com o objetivo de estabelecer limites de segurança no mergulho por forma a prevenir a DD. Para o cálculo tem em conta fatores como a profundidade, o tempo de fundo, a temperatura da água, velocidade de subida, entre outros. (DIPN'DIVE, s.d.)

Pode ainda dizer-se que se trata de um modelo de previsão do comportamento dos gases inertes nos vários tecidos quando o mergulhador respira a diferentes pressões ambiente (Chapman, 1999). De realçar que estes modelos não medem diretamente a quantidade de gás dissolvida nos tecidos, medem apenas os fatores externos, que levam a um maior ou menor acumular deste gás no corpo. Como tal os resultados que apresentam podem não representar a realidade uma vez que existem

ainda fatores fisiológicos do mergulhador que não são tidos em conta como a hidratação, a fadiga muscular, entre outros. (Chapman, 1999) (Eun, J.Y.Kim, & Lee, 2019)

Existem vários algoritmos desenvolvidos e todos têm as mesmas fontes de dados (profundidade, tempo de fundo, etc...). No entanto, com o mesmo perfil de mergulho os resultados podem diferir. Isto acontece, primeiro, porque o algoritmo pode ter diferentes definições daquele que é o risco máximo aceitável de DD e consequentemente ter um mergulho mais permissivo ou mais restritivo e, segundo, devido aos processos matemáticos utilizados e respetivos arredondamentos. (DIPN'DIVE, s.d.)

Do ponto de vista técnico, um algoritmo de descompressão, tem de ser capaz de simular dois grandes processos principais. O primeiro serão os fenómenos governados pelas leis da física, que por si só são já bastante complexos. Na maioria dos casos é possível reproduzir estes eventos e validá-los com um determinado número de dados. O segundo grande processo trata-se da fisiologia do corpo humano. Além de ser necessário simular a difusão dos gases pelo corpo, é essencial integrar também os modelos de descompressão e a DD, sem os quais o algoritmo não tem qualquer valor. (Angelini, 2018)

Assim, uma representação da fisiologia do corpo humano será provavelmente possível, mas também extremamente complexa. É necessário simular fenómenos como a corrente sanguínea, difusão dos gases, formação e crescimento de bolhas e ainda incluir um sem número de processos químicos que decorrem. Mesmo com todos estes pontos abordados o algoritmo pode ainda não representar uma aproximação adequada o suficiente devido a fatores que dificilmente podem ser controlados pelo algoritmo tais como a hidratação, o sono e a nutrição do mergulhador, além dos fatores individuais e próprios de cada um, que também podem variar de um dia para o outro. (Angelini, 2018)

À data da presente dissertação existem dois grandes modelos de descompressão, *Dissolved Gas Models* e *Bubble Models*. (Angelini, 2018)

O *Dissolved Gas Model* descreve o corpo como um aglomerado de compartimentos, cada um definido por duas variáveis. Uma das variáveis será a velocidade de absorção e descompressão do compartimento (*half-time*) e a outra a capacidade máxima que o compartimento tem para aguentar uma pressão superior à pressão ambiente (*M-value*). (Angelini, 2018)

Num *Bubble model*, as bolhas formadas nos tecidos são controladas conforme crescem ou encolhem ao longo do mergulho, com gases a entrar ou sair das mesmas devido às variações da pressão ambiente. (Angelini, 2018)

2.3.1. Bubble models

A teoria de Haldane só contempla a quantidade de gás inerte dissolvida nos tecidos e defende que só existe a formação de bolhas quando se atingisse a supersaturação. No entanto, com o desenvolvimento do *Doppler Bubble Detection* percebeu-se que as mesmas bolhas existiam muito antes dos tecidos estarem saturados, e até estariam presentes mesmo quando o corpo se encontra em equilíbrio de gases à superfície. (Powell, 2014)

Desta forma surgem os *Bubble Models* ou *Dual Phase Models* que têm em conta, além dos gases dissolvidos nos tecidos como na teoria de Haldane, o crescimento ou diminuição destas bolhas que já se encontram alojadas sobre a forma de micronúcleos. O termo *Dual Phase* refere-se a estes dois momentos do gás, *free phase* quando o gás se encontra na forma de bolhas e *dissolved phase* quando dissolvido nos tecidos. (Powell, 2014)

2.3.2. Deep Stops

O controlo da subida é um dos fatores cruciais a ter em conta durante a descompressão. Saber a que velocidade subir e em que profundidade se deve

permanecer, durante quanto tempo, são alguns dos fatores essenciais a este processo. (Powell, 2014)

Por forma a evitar o desenvolvimento de DD criaram-se alguns métodos de subida (*Scheduled Ascents*, em inglês). Richard Pyle foi quem desenvolveu o método mais comum utilizado, as *Pyle Stops*, que consistiam num cálculo empírico de uma série de patamares de descompressão, antes de atingir o primeiro patamar definido pelo computador de mergulho. O cálculo efetua-se da seguinte forma (Powell, 2014):

1. Encontrar o valor médio entre a profundidade máxima do mergulho e a profundidade do primeiro patamar de descompressão;
2. Se a profundidade obtida for superior à profundidade do primeiro patamar mais nove metros, repetir o processo no ponto 1 com a profundidade da primeira *deep stop* e o primeiro patamar.
3. Repetir até que a distância entre a última *deep stop* e o primeiro patamar seja inferior a nove metros.

Pyle desenvolveu este cálculo através de dados que recolheu de uma quantidade apreciável de mergulhos que realizou e após integrar este método, reduziu significativamente a incidência de DD nos mergulhos que realizou. (Powell, 2014)

2.3.3. Gradient Factors

O conceito de *M-value* como referido no subcapítulo 2.2.5. tem por base o limite do diferencial entre a pressão dissolvida nos tecidos e a pressão ambiente suportável. (Baker, 1998)

O desenvolvimento de novas tecnologias e de equipamentos permitem uma avaliação mais objetiva e aprofundada do que simplesmente verificar a ocorrência de DD através da apreciação do mergulhador. Surge a avaliação através de *Doppler Bubble Detection*. Com este equipamento percebeu-se ainda que o desenvolvimento da doença pode ocorrer antes de ser atingido o *M-value*. Pelo que se torna necessário definir um modelo mais conservador. (Powell, 2014)

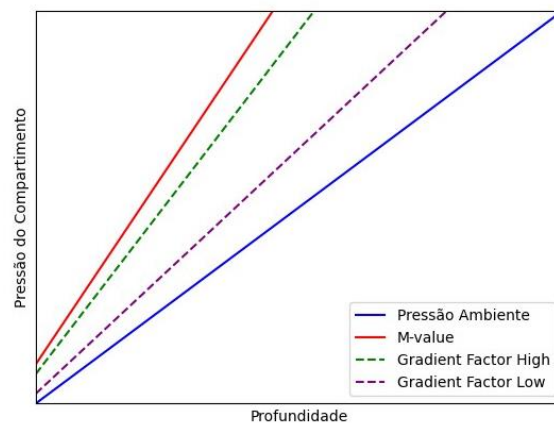


Figura 4-Gradient Factors, adaptado de Powell,2014

Os *Gradient Factors* (GF) são limites relativos à distância entre o *M-value* (100%) definido para cada compartimento e a pressão ambiente (0%). A utilização de GF's compreende sempre a definição de um valor superior e outro inferior, respectivamente GF (*high*) e GF (*low*). (Powell, 2014)

Estes valores irão, durante o período de descompressão, limitar em tempo e profundidade os vários patamares de descompressão. Utilizando um GF (*high*) alto obtém-se um período de descompressão menor, tendo em conta que se aproxima mais do *M-value* e, portanto, o diferencial de pressão é maior, o que aumenta a velocidade de eliminação dos gases dos compartimentos e, por consequência, o risco de desenvolvimento de DD será também maior. O efeito oposto obtém-se reduzindo o GF (*high*). Utilizando um GF (*low*) alto provoca-se a utilização de mais patamares de descompressão com durações menores do que utilizando um GF (*low*) mais baixo, definindo também o momento do primeiro patamar. (Powell, 2014)

Observe-se agora a figura 5 que ilustra a descompressão de um mergulho (meramente ilustrativo, não representa dados reais):

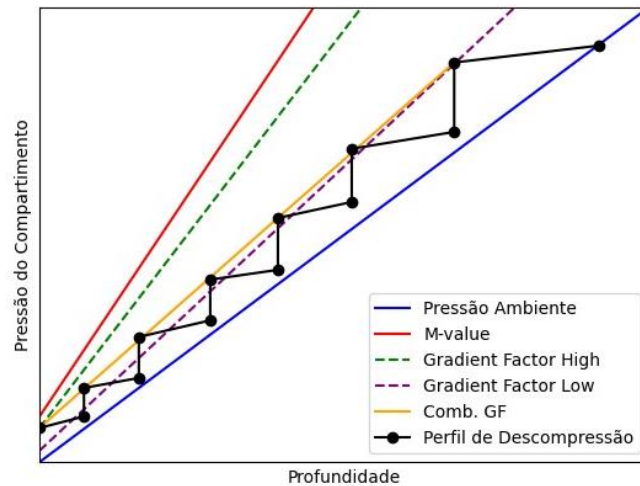


Figura 5-Perfil de Descompressão adaptado de Powell, 2014

A teoria por trás da utilização de GF's é realizada através da definição de uma primeira linha que une o ponto em que GF (*high*) cruza a profundidade 0 ou a pressão ambiente à superfície e a pressão de gás inerte presente no compartimento mais limitativo quando este atinge o GF (*low*), esta linha está representada na figura 5 a laranja com o nome "Comb. GF". (Powell, 2014)

O perfil que deverá depois ser realizado pelo mergulhador, representado a preto com o nome "Perfil de Descompressão", segue um padrão composto entre subidas até atingir o ponto de saturação da combinação dos dois GF àquela profundidade (Linha laranja) e patamares de descompressão que reduzem a pressão no compartimento até ao ponto de saturação na mesma profundidade, lembrando que em todo o período de descompressão os compartimentos encontram-se com pressão de gás dissolvido superior à ambiente por forma a efetuar *off-gassing*. Esta alternância deverá ser repetida até atingir a superfície. (Powell, 2014)

3. Algoritmos de Descompressão

3.1. DCIEM 1983

Na Marinha Portuguesa são utilizados diferentes algoritmos em diferentes situações. No entanto, na maioria dos mergulhos e especialmente quando é adotada a política do mergulho quadrado (que será desenvolvida no capítulo seguinte) são utilizadas as chamadas “tabelas canadianas” que correspondem ao algoritmo DCIEM (Defence and Civil Institute of Environmental Medicine). (Department of National Defence of Canada, 2016)

Este modelo começou a ser desenvolvido por Kidd & Stubbs em 1962 e só foi concluído em 1983. Foi validado através da utilização de *Doppler Ultrasonic Bubble Detector*, que é um instrumento que analisa a atenuação da energia acústica e conseqüente variação da pressão induzida pelas bolhas, assim determinando a existência e o tamanho das mesmas (Jiawei Yuan, 2023). O modelo foi desenvolvido com o pressuposto de ser utilizado com misturas de ar ou oxigénio para a descompressão. Neste âmbito prevê a descompressão com ar, oxigénio ainda na água e oxigénio à superfície com circuitos fechados, semifechados ou abertos. Também pode ser utilizado para mergulhos repetitivos. (Department of National Defence of Canada, 2016)

O modelo usa por definição uma velocidade de subida (*ascent rate*) de 18 metros por minuto com uma margem de 3 metros por minuto. No caso de, durante a subida, a velocidade reduzir para menos de 15 metros por minuto, este atraso tem de ser considerado, uma vez que pode implicar a redefinição do perfil de descompressão. (Department of National Defence of Canada, 2016)

O método para o cálculo da saturação e descompressão neste modelo é efetuado através da seguinte equação (Lippmann & Wellard, 2004):

$$pN_2 = pN_2^0 + (pN_{2insp} - pN_2^0) \times (1 - 2^{-\Delta t/T}) \quad (7)$$

Em que:

- pN_2 é a pressão parcial de azoto;
- pN_2^0 é a pressão parcial inicial de azoto;
- T é o *half time* do compartimento;
- t é o tempo de exposição.

Este modelo estabelece ainda limites para o mergulho com ar:

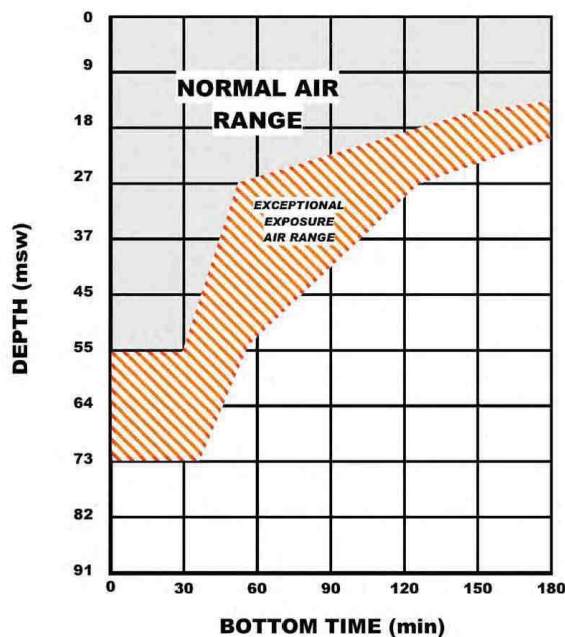


Figura 6-Limites para o mergulho com ar adaptado de Department of National Defense of Canada, 2016

3.2. Bühlmann ZHL-16

O algoritmo de Bühlmann prevê a existência de tecidos “rápidos” e tecidos “lentos”, devido a variabilidade da perfusão do sangue pelos tecidos e da difusão dos gases entre tecidos. Desta forma Bühlmann entendeu que, para uma boa aproximação aos processos reais que decorrem no organismo, seria necessária uma divisão do mesmo. Os tecidos que possuem uma elevada perfusão são, por esta mesma razão, mais rapidamente saturados que outros tecidos onde não haja tanta alimentação de sangue. São exemplo destes o sangue, o sistema nervoso central e os órgãos vitais. (Chapman, 1999)

Assim dividiu o corpo em 16 compartimentos, em que cada um compreende conjuntos de tecidos com *half times* semelhantes. Para o cálculo da quantidade de gás inerte em cada compartimento, Bühlmann desenvolveu a seguinte equação (Bühlmann, 1983):

$$P_{sat} = P_{inicial} + (P_{gás\ inerte} - P_{inicial}) \times [1 - 2^{(-\frac{t_{exp}}{ht})}] \quad (8)$$

Em que:

- P_{sat} é a pressão de gás inerte no compartimento após a exposição;
- $P_{inicial}$ é a pressão de gás inerte no compartimento antes da exposição;
- $P_{gás\ inerte}$ é a pressão de gás inerte na mistura a ser respirada;
- t_{exp} é o tempo de exposição;
- ht é o *half time* do compartimento a ser avaliado.

Tendo determinado a pressão de gás inerte dissolvida nos compartimentos resta calcular até que profundidade o mergulhador pode subir em segurança sem se submeter a um risco exagerado de desenvolver DD. Bühlmann estipulou dois coeficientes que serão depois utilizados para o cálculo da variação máxima de pressão tolerada, a e b, que podem ser calculados da seguinte forma (Chapman, 1999):

$$a = 2 \times (ht)^{-\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$b = 1.005 - (ht)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Estes coeficientes variam entre cada compartimento em função do *half time* como se pode inferir das equações.

Finalmente para o cálculo da redução máxima de pressão tolerada, P_{tol} (Bühlmann, 1983):

$$P_{tol} = (P_{sat} - a) \times b \quad (11)$$

P_{tol} , tem de ser calculado para todos os compartimentos, aquele que apresentar o valor mais elevado será o compartimento limitante. Diferentes tipos de mergulho terão diferentes compartimentos limitantes. Se dividirmos qualitativamente os vários compartimentos em “lentos”, “médios” e “rápidos” conforme a velocidade de *on-gas* e *off-gas* que cada um tem e compararmos com características genéricas e qualitativas de mergulhos pode inferir-se o seguinte (Chapman, 1999):

Tabela 2-Compartimentos Limitantes

		Tempo de Fundo	
		Curto	Longo
Profundidade	Baixa	Rápidos	Médios
	Elevada	Médios	Lentos

É ainda comum que durante a descompressão o compartimento limitante altere, o que se deve à velocidade de *off-gas* que os vários compartimentos têm. Pode suceder, num mergulho mais profundo, inicialmente ser limitado por compartimentos mais rápidos, mas devido à rápida velocidade de *off-gas* destes, passar o fator limitante para um compartimento “médio”.

Quando a P_{tol} calculada para o compartimento mais limitativo for menor que 1 bar assume-se que seja possível uma subida direta até à superfície a uma velocidade de 9 metros por minuto, uma vez que a pressão neste nível é maior que a pressão mínima tolerada pelos compartimentos e, portanto, segundo o modelo não existe um risco significativo de desenvolver DD (Bühlmann, 1983).

As equações e valores estabelecidos por Bühlmann foram desenvolvidos, testados e validados tendo em conta a utilização de ar. Os *half times* determinados para este modelo utilizando hélio na mistura foram derivados dos valores para azoto assumindo que o único fator significativo seria a difusividade do gás inerte. Antes de poderem ser validados os dados para o hélio, Bühlmann faleceu. Mais tarde, decorrente de vários estudos mostrou-se que estes valores eram demasiado conservadores (Chapman, 1999). Atualmente, o hélio é, comprovadamente, um gás

inerte que facilita a descompressão devido à alta difusividade e pouca solubilidade nos tecidos, no entanto, também apresenta um perigo acrescido de formação de bolhas pelo que a velocidade de subida tem de ser mais lenta e os patamares de descompressão mais profundos quando comparado a um mergulho com ar. (Chapman, 1999)

3.3. US Navy

O algoritmo da US Navy foi validado por Thalmann em 1984 recorrendo a uma série de testes que envolveram 228 mergulhos de onde surgiram apenas 11 casos de DD. Com a utilização deste modelo espera-se uma incidência máxima de DD de 3,5% (estatisticamente, assumindo uma distribuição binomial com um nível de confiança de 95%) (Thalmann, 1984).

Este, ao contrário da generalidade dos algoritmos, não utiliza o mesmo método para determinar o *on-gas* e o *off-gas*. Neste caso é utilizada a teoria E-L (exponencial-linear) o que significa que assume que o *on-gassing* seja exponencial, mas o *off-gassing* seja linear. (Thalmann, 1984)

A equação exponencial que descreve o processo de *on-gassing* é a seguinte (Thalmann, 1984):

$$P_{sat} = P_{gás\ inerte} + (P_{inicial} - P_{gás\ inerte}) \times e^{-ht \times t_{exp}} \quad (12)$$

Em que:

- P_{sat} é a pressão de gás inerte no compartimento após a exposição;
- $P_{inicial}$ é a pressão de gás inerte no compartimento antes da exposição;
- $P_{gás\ inerte}$ é a pressão de gás inerte na mistura a ser respirada;
- t_{exp} é o tempo de exposição;
- ht é o *half time* do compartimento a ser avaliado;
- $P_{gás\ inerte} = P_{amb} - P_{pO_2} - 1.5 (P_{amb} - \text{Pressão ambiente absoluta})$;
- Todas as pressões são medidas em fsw.

A equação linear que descreve o *off-gassing* é a seguinte (Thalmann, 1984):

$$P_{sat} = P_{inicial} + (2.8 - Pp_{O_2}) \times ht \times t_{exp} \quad (13)$$

Tal como no algoritmo de Bühlmann, este também utiliza um conceito semelhante a *M-value*, neste caso MPTT (Maximum Permissible Tissue Tension) e definiu 7 diferentes critérios de subida (*ascent criteria*) por forma a testar qual o que apresentava melhores resultados na prevenção de DD mantendo, ainda assim, LND's e períodos de descompressão aceitáveis. O critério VVAL18 (Variable Value Allowed) foi escolhido como o que melhor cumpria com os requisitos, com uma velocidade de descida de 75 fsw por minuto (22 msw por minuto) e uma velocidade de subida de 30 fsw por minuto (9 msw por minuto). (Thalmann, 1984)

Thalmann definiu ainda que compartimentos limitam os LND tendo em conta a profundidade. No entanto, só os testou até aos 120 fsw (36 msw). A tabela 3 representa estes valores (Thalmann, 1984):

Tabela 3-Compartimentos Limitantes US Navy

Profundidade fsw (msw)	Compartimento limitante
40 (12)	120 min
50 (15)	80 min
60 (18)	40 min
80 (24)	40 min
100 (30)	40 min
120 (36)	10 min

Ainda teorizou que o compartimento limitante aos 140 fsw (42 msw) seria o de 5 min, no entanto, devido a limitações de tempo não foi possível validar estes valores. (Thalmann, 1984)

Em suma o algoritmo da US Navy utiliza o modelo Exponencial-Linear e assume um Pp_{O_2} fixo com o *Ascent Criteria* VVAL18. É um algoritmo que procura estender LND's e reduzir tempos de descompressão, maximizando o *stress* descompressivo sem

provocar o surgimento de DD. No entanto, todos os valores testados e validados são referentes ao uso de azoto na mistura de ar respirável. (Thalmann, 1984)

4. Análise de Perfis de Mergulho com Base em Entrevistas

O presente capítulo tem por base entrevistas exploratórias com elementos dos vários Destacamentos de Mergulhadores Sapadores da Marinha Portuguesa realizadas pelo autor da presente dissertação com o objetivo de apurar perfis de mergulho que reflitam a atividade praticada pela instituição, mantendo um número limitado por forma a manter o estudo e análise possível.

O método para reduzir o número de variáveis associadas a cada mergulho passa por definir perfis padrão que contemplem como variáveis o tempo de fundo, a profundidade e a mistura respiratória a que decorreu o mergulho, descartando assim qualquer variável fisiológica, tal como estabelecido nos Objetivos de Estudo. A definição do padrão em cada destacamento é descrita no subcapítulo respetivo.

4.1. Mergulho Quadrado

O perfil de mergulho resume-se, na verdade, a uma função que tem como variáveis a profundidade e o tempo. Estes são os fatores predominantes na determinação do perfil descompressivo que depois vem a ser determinado.

O perfil de mergulho é representado pela função quadrado, tomando a profundidade máxima do mergulho como constante e o tempo de fundo como o intervalo entre o início do mergulho e o início da subida. As premissas que fundamentam a escolha deste perfil têm por base as variáveis que afetam a absorção de azoto pelo corpo, são elas a profundidade, tendo em conta que quanto maior a profundidade maior será o gradiente da pressão parcial de azoto e, portanto, maior a absorção e a duração da exposição, ou seja, o tempo de fundo. Obtendo-se um gráfico com o seguinte aspeto (Department of National Defence of Canada, 2016):

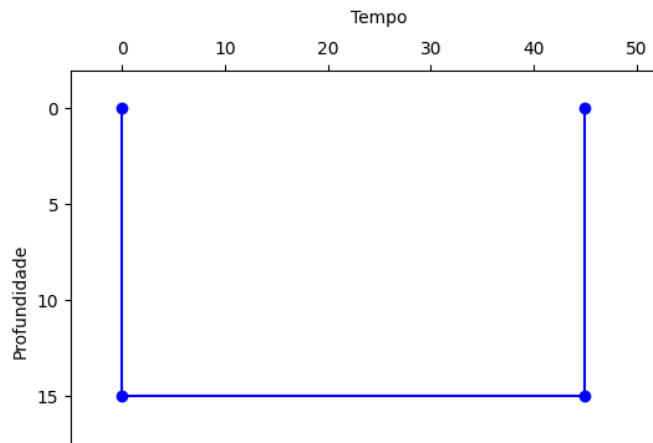


Figura 7-Mergulho quadrado

Os três DMS da Marinha Portuguesa utilizam por defeito este perfil, a menos que a natureza dos trabalhos implique um modelo diferente, como em mergulhos profundos por exemplo. E definem, como algoritmo de descompressão, para calcular o respetivo perfil descompressivo o DCIEM, explicado no capítulo 3.

No ambiente militar a permanência na área de operações por um tempo maior do que o necessário é, em qualquer situação, algo a evitar por ter sempre custos associados, seja a nível de risco, de recursos humanos ou financeiro.

4.2. Destacamento de Mergulhadores Sapadores 1

O DMS 1 dedica-se ao mergulho de combate, mas engloba também a Inativação de Engenhos Explosivos (IEE) no âmbito de *Force Protection* ou *Shaping Operations* em apoio a operações anfíbias.

Perfis de Mergulho Típicos

O perfil de mergulho típico deste destacamento tem uma profundidade de 6 metros e até aproximadamente 120 minutos de submersão. Existem, no entanto, situações como a inativação de engenhos explosivos, em que pode ir tão fundo quanto os 54 metros, caso em que a autonomia é significativamente reduzida. Neste caso o mergulho de inativação propriamente dito, que tem uma duração de cerca de 10 minutos, é precedido por outro, realizado por outro mergulhador que tem por fim a

identificação e localização do engenho explosivo à mesma profundidade, mas com uma duração superior.

Mistura de Gases utilizadas

No mergulho o DMS 1 utiliza ar, oxigénio puro ou uma série de diferentes misturas de EAN conforme as profundidades e tempo que se pretendem praticar. Nas incursões de natação submarina que não ultrapassam os 6 metros de profundidade a utilização de oxigénio puro é o procedimento mais comum, o que levanta a preocupação da exposição a este gás. Como referido antes, respirar 100% oxigénio a profundidades superiores a 6 metros pode causar hiperóxia, levando à necessidade de abortar o mergulho antes de concluída a tarefa.

Preocupações e Limitações Próprias do Mergulho

Tendo em conta o tipo de mergulho praticado pelo DMS 1 a principal preocupação no mergulho será a exposição ao oxigénio tendo em conta a utilização deste gás puro e os perigos que este oferece ao SNC. Por se tratar de um gás metabolizável, os perigos relativos à descompressão não são apreciáveis uma vez que não há uma saturação dos tecidos e, portanto, não se constitui um elemento a ter em conta para os algoritmos de descompressão.

As incursões de natação submarina são limitadas, quando não existem outros fatores inopinados, pela autonomia da garrafa utilizada que por regra permite até cerca de 120 minutos de tempo de fundo.

Por outro lado, o mergulho para inativação de engenhos explosivos é limitado pelo tempo disponível para efetuar um mergulho não-descompressivo. O objetivo neste tipo de mergulho é retirar o mergulhador da água o mais rapidamente possível para que não esteja exposto ao risco de ser afetado pelo explosivo caso este deflagre inopinadamente. O interesse reside, portanto, em que o mergulhador coloque a carga explosiva e retorne à superfície dentro do tempo “não-descompressivo”. A maiores profundidades este tempo é bastante reduzido, tomando por exemplo aos 40 metros

com OC e respirando ar o intervalo para mergulho não-descompressivo é de 8 minutos, sendo que se ultrapassar este valor será obrigado a realizar patamares de descompressão ainda na água.

Equipamento Utilizado

Para o primeiro tipo de mergulho, a incursão de natação submarina ou o mergulho de combate, o DMS 1 utiliza o “LAR 5000” da DRÄGER e, mais recentemente, o “CAIMANO MK4” da SIEL. Ambos CCUBA (*Closed Circuit Underwater Breathing Apparatus*) que permitem a utilização de oxigénio puro num circuito fechado ou a utilização de misturas EAN em SCR para incursões mais profundas. Operando com oxigénio puro não são utilizados computadores de mergulho uma vez que não existe a preocupação com a descompressão.

Nas operações de mergulho de IEE, é utilizado o “Viper-SC”, um equipamento desenhado especificamente para *Mine Counter Measures* (MCM) com baixa assinatura magnética e acústica de acordo com as características especificadas pela NATO que permite o mergulho até aos 54m com misturas EAN em SCR.

Perfil Padrão

O mergulho de combate ao utilizar oxigénio puro não tem qualquer impacto a nível de descompressão, pelo que para o estudo em causa será descartado uma vez que não é necessário realizar qualquer perfil de descompressão.

O mergulho em operações IEE submarinas, por outro lado tem um interesse acrescido, uma vez que são utilizados equipamentos de SCR, é necessário definir que mergulhos podem representar o padrão. Desta forma optou-se por utilizar os limites de profundidade para cada mistura de gases utilizada, visto que são aqueles em que existe uma maior exigência a nível de saturação dos tecidos e, portanto, serão os casos em que existe também uma maior probabilidade de surgir DD. A relação entre as misturas de gases e a profundidade máxima está já estabelecida e encontra-se representada abaixo (NATO, 2020):

- 60% O₂ / 40% N₂ – 24 metros;
- 40% O₂ / 60% N₂ – 42 metros;
- 32,5% O₂ / 67.5% N₂ – 54 metros.

O tempo de fundo de cada um destes perfis é definido através da duração normal dos mergulhos de IEE em que existe um primeiro mergulho com uma duração de aproximadamente 20 minutos e um segundo com uma duração menor, cerca de 10 minutos. Como a saturação dos tecidos aumenta com o tempo de exposição, para efeitos de estudo utilizar-se-á o primeiro mergulho por ser maior.

Ou seja, os perfis de mergulho do DMS 1 serão os seguintes:

Tabela 4-Perfis de mergulho DMS 1

Perfil	Profundidade (m)	Tempo de Fundo (min)	Mistura Respiratória (%O ₂ /%N ₂)
A1	24	20	60/40
B1	42	20	40/60
C1	54	20	32.5/67.5

Com esta informação é possível calcular EADs, no entanto, como neste destacamento é utilizado um SCR, é necessário ainda realizar ajustes à mistura uma vez que devido ao gasto metabólico normal do corpo a mistura respirada não corresponde exatamente à mistura presente na garrafa. Para este cálculo é necessário primeiro calcular o fluxo da mistura (MF) (Department of National Defence of Canada, 2016).

$$MF = \frac{160}{\%O_2 - 20} \quad (14)$$

Em que %O₂ é a fração de oxigénio na mistura respiratória.

De seguida calcula-se o fluxo de oxigénio na mistura (OFR) (Department of National Defence of Canada, 2016):

$$OFR = \frac{\%O_2}{100} \times MF \quad (15)$$

Assim é possível calcular a fração de oxigénio presente no loop ($O_2\%(\text{loop})$), este valor não é igual à fração da garrafa devido ao constante gasto metabólico que se pode assumir como 1.3 slm (*standard liters per minute*) (Department of National Defence of Canada, 2016):

$$O_2\%(\text{loop}) = \frac{OFR-1.3}{MF-1.3} \times 100 \quad (16)$$

Da percentagem de oxigénio pode retirar-se a percentagem azoto bastando para isso subtrair o valor a 100. Por fim pode finalmente aplicar-se a equação para EAD (equação 4).

Tabela 5-EAD DMS1

Perfil	MF	OFR	$O_2\%(\text{loop})$	$N_2\%(\text{loop})$	EAD (calculada)	EAD (tabela)
A1	4	2.4	40.7	59.3	15.5	18
B1	8	3.2	28.4	72.6	37.2	39
C1	12.8	4.16	24.9	75.1	50.8	51

4.3. Destacamento de Mergulhadores Sapadores 2

O DMS 2 tem um vasto espetro de empenhamentos. Atua em áreas como a salvação marítima, a assistência a unidades navais e ainda trabalhos subaquáticos. Colabora ainda em atividades científicas e em conjunto com a Proteção Civil no apoio a catástrofes.

Perfis de Mergulho Típicos

Geralmente, este destacamento pratica mergulho que não necessita de realizar patamares de descompressão. Todos os trabalhos que correspondem ao *salvage* (trabalhos subaquáticos) como a recuperação ou reflutuação de material tendencialmente são feitos dentro dos LND. Por norma é um mergulho pouco profundo até aos 12 metros e com tempos de fundo até aos 60 minutos. No entanto, tem a capacidade de mergulhar com OC até aos 54 metros com recurso a misturas respiratórias EAN.

Existem ainda assim situações, que exigem a utilização de um computador de mergulho e a adoção de um perfil errático com subidas e descidas mais frequentes. É o caso das buscas em ambientes confinados. Por ambientes confinados compreende-se todo o espaço que não tenha acesso direto a superfície como o interior de navios submersos ou cavernas.

Mistura de Gases utilizadas

Devido à natureza das suas funções que não exigem um especial cuidado com a discipção como no DMS 1, nem um sistema CCR como o DMS 3, o DMS 2 utiliza por norma um OC com mistura de ar ou EAN conforme a necessidade apresentada pela tarefa. Pode ainda utilizar oxigénio puro em trabalhos que não excedam os 6 metros de profundidade.

Em certos casos em que o ambiente permite, pode ser também utilizado um sistema *surface supplied*, em que a mistura respiratória é fornecida ao mergulhador através de um cabo umbilical ligado à superfície a uma consola de controlo de pressões, que é alimentada por um compressor próprio para o trabalho ou recorrendo a garrafas. Importa salientar que neste caso também podem ser utilizadas misturas de ar ou EAN conforme as características da tarefa.

Preocupações e Limitações Próprias do Mergulho

O principal fator limitativo neste tipo de mergulho será a autonomia da garrafa quando a utilizar OC. Uma vez que estes mergulhos por regra são realizados a baixas profundidades, a descompressão não é, por regra, um fator que limite os mesmos.

No entanto, quando é necessário aumentar a profundidade como para realizar buscas torna-se necessário ter em conta a diminuição do tempo limite para mergulho não-descompressivo. Quanto maior a profundidade menor o tempo disponível sem descompressão.

A missão deste destacamento, especialmente na vertente de apoio a catástrofes ou acidentes pode exigir que o mergulho seja realizado em altitude.

Considera-se que o mergulho é realizado em altitude quando este é realizado a mais de 300 m acima do nível médio do mar (PADI, 2015). Este tipo de mergulho exige um ajuste dos valores das tabelas ou algoritmos de mergulho uma vez que a pressão à superfície é inferior à pressão ao nível do mar e, derivado deste facto, também os perfis de descompressão terão algumas alterações tendo em conta o facto do mergulhador estar ou não aclimatizado e a altitude específica a que se encontra, sendo que um mergulho em altitude tem uma profundidade equivalente sempre superior quando comparado a um mergulho ao nível do mar. (Department of National Defence of Canada, 2010)

Equipamento Utilizado

A nível de equipamento como referido anteriormente o DMS 2 recorre a sistemas de OC ou à modalidade *surface supplied* com misturas de ar, EAN ou em certas situações pode também recorrer a oxigénio puro conforme a necessidade apresentada pela missão.

Perfil Padrão

O DMS 2 tem um espectro de operações extremamente variado pelo que uma representação exaustiva de todos os perfis de mergulho não é viável. Assim, optou-se por definir 5 perfis tipo mais complexos mantendo um número reduzido que permita o seu estudo, não deixando de representar a realidade do âmbito de operações do DMS 2. Após consulta com o Destacamento e com o Comandante do Agrupamento de Mergulhadores os perfis de mergulho determinados foram os seguintes:

Tabela 6-Perfis de mergulho DMS 2

Perfil	Profundidade (m)	Tempo de fundo (min)
A2	12	90
B2	18	50
C2	30	40
D2	39	20
E2	51	10

Estes perfis utilizam misturas respiratórias diferentes. Os perfis A2 e B2 utilizam ar uma vez que a profundidade é reduzida e, portanto, o nível de saturação dos tecidos não justifica a utilização de EAN. O perfil E2 utiliza também ar uma vez que a profundidade não permite a utilização de uma mistura EAN que ofereça uma redução significativa da profundidade equivalente e tendo ainda em conta o aumento dos perigos da toxicidade do oxigénio ao respirar misturas enriquecidas deste gás a grandes profundidades, como é o caso do perfil E2. Já os perfis C2 e D2 com profundidades intermédias utilizam misturas respiratórias EAN que se considerem mais adequadas, vulgo, *best mix*. Considera-se como *best mix* a mistura que apresente a menor fração de azoto sem incorrer numa pressão parcial de oxigénio demasiado elevada para a profundidade a que o mergulho é realizado. As proporções de oxigénio utilizadas são calculadas seguindo a equação 17, abaixo (Department of National Defence of Canada, 2004):

$$\%O_2 = \frac{PpO_2}{P_{abs}} \quad (17)$$

Em que:

- PpO_2 é a pressão parcial de oxigénio em que o nível recomendado será 1.4 bar (Department of National Defence of Canada, 2004);
- P_{abs} é a pressão absoluta, determinada pela profundidade;
- $\%O_2$ é a fração de oxigénio a utilizar na mistura respiratória.

A fração de azoto é a percentagem restante para completar os 100%, por exemplo se a mistura utilizar 30% de oxigénio a percentagem de azoto serão 70%.

Desta forma as misturas utilizadas para cada perfil serão as seguintes:

Tabela 7-Relação Profundidades-mistura

Perfil	Profundidade (m)	Pressão Absoluta (bar)	Mistura utilizada (%O2/%N2)
A2	12	2.2	21/79 (ar)
B2	18	2.8	21/79 (ar)
C2	30	4	33/67
D2	39	4.9	28/72
E2	51	6.1	21/79 (ar)

Com isto é possível calcular a EAD para os perfis definidos em cima, e não serão necessários cálculos extraordinários como para o DMS 1, visto que os perfis definidos utilizam OC:

Tabela 8-EAD perfis DMS2

Perfil	Profundidade (m)	%N2	EAD (tabela)
A2	12	79	-
B2	18	79	-
C2	30	67	24
D2	39	72	35
E2	51	79	-

4.4. Destacamento de Mergulhadores Sapadores 3

O DMS 3 é o destacamento dedicado ao mergulho profundo e *Mine Counter Measures*. Tem certificação para efetuar mergulho até aos 81 metros com o equipamento “Viper Plus” e com recurso a misturas respiratórias que incluem hélio, e à data da elaboração da presente dissertação encontra-se a realizar a formação necessária para estender a certificação até aos 100 metros.

Perfis de Mergulho Típicos

Devido à semelhança das operações em que estão envolvidos o mergulho para MCM partilha vários aspetos em comum com o mergulho para IEE do DMS 1. Desta forma a operação é constituída por, pelo menos, 2 mergulhos. Um inicial para busca, identificação e assinalamento da posição da mina e de seguida um segundo para a

colocação da carga que fará detonar a mina. O primeiro mergulho tem uma duração superior, por regra 20 a 30 minutos, a profundidades algo variáveis uma vez que se estão a efetuar buscas, evitando sempre que o mergulho se torne descompressivo. O segundo tem uma duração menor, pois apenas exige que o mergulho desça até à profundidade a que se encontra a mina, já assinalada, coloque a carga explosiva e retorne à superfície, tomando aproximadamente 10 minutos.

O mergulho para inativação de minas costuma ter profundidades até aos 50 metros, e por norma encontra-se entre os 30 e os 40 metros. Não é comum encontrar ou inativar minas a profundidades maiores porque estas já não representam um perigo para os navios à superfície devido ao tamanho da coluna de água e consequente dissipação do efeito de alquebramento.

O modelo seguido neste tipo de mergulho, apesar de ser realizado a profundidades significativas continua a ser o mergulho quadrado, com a premissa de ser o modelo mais seguro apesar de implicar tempos de fundo com patamares descompressivos que possivelmente nem sejam necessários.

Este destacamento executa ainda o mergulho profundo que geralmente é caracterizado por se atingirem grandes profundidades, mas para evitar grandes períodos de descompressão tem tempos de fundo reduzidos.

Mistura de Gases utilizadas

O DMS 3 assim como os restantes destacamentos também tem a capacidade e formação necessária para utilizar misturas de ar e EAN a diferentes percentagens.

Em mergulhos mais profundos (abaixo dos 54 metros) é utilizado um equipamento que permite utilizar misturas de HELIOX (hélio e oxigénio). O hélio é um gás inerte tal como o azoto. É utilizado em profundidades maiores devido às suas propriedades físicas. Assim como o azoto este gás é dissolvido pelos tecidos do corpo através da circulação sanguínea. No entanto, a velocidade de descompressão é muito menor quando comparada a ar. Existe ainda a vantagem de reduzir a possibilidade de

ocorrência de narcose uma vez que a pressão parcial de azoto é menor ou até mesmo nula. (Powell, 2014)

Vulgarmente chama-se a misturas que incluam os três gases TRIMIX e HELIOX a misturas que tenham apenas hélio e oxigénio.

Preocupações e Limitações Próprias do Mergulho

No mergulho profundo o principal fator limitador será o tempo de fundo, uma vez que a grandes profundidades o período de descompressão aumenta consideravelmente com o tempo de fundo. Desta forma é desejável que o mergulho seja sempre tão curto quanto possível para evitar períodos descompressivos, ou caso não seja possível, reduzi-los ao mínimo.

No mergulho para inativação de minas a maior preocupação reside no risco a que o mergulhador está exposto, daí ser raro entrar em períodos descompressivos e, portanto, a descompressão não é o fator mais relevante, da mesma forma que a autonomia do equipamento também não é limitativa.

Equipamento Utilizado

O equipamento utilizado pelo DMS 3, merece especial atenção. Até recentemente utilizava o sistema “Viper Plus” para o mergulho profundo (até aos 81 m) e o “Viper SC” para a inativação de minas. Ambos os equipamentos são considerados *Semi Closed Rebreathers* (sistemas semifechados) e têm uma baixa assinatura magnética e acústica. Estes sistemas têm por desvantagem a morosidade dos procedimentos e testes pré-mergulho. O tipo de operação do DMS 3 por vezes exige rapidez e a urgência da missão obriga a recorrer a equipamento mais simples e eficaz.

À data da elaboração da presente dissertação o agrupamento de mergulhadores encontra-se a receber formação para começar a operar com o sistema “JJ-CCR” que permitirá o mergulho até aos 100 metros de profundidade. Este sistema

apresenta uma maior facilidade de utilização e preparação pelo que se adequa melhor à natureza de operações do DMS 3.

Perfil Padrão

O perfil padrão do DMS 3 é idêntico ao perfil determinado para o DMS 1 tendo em conta os perfis de mergulho habituais de ambos os destacamentos. Apesar de terem funções diferentes, o perfil que ambas fazem, o equipamento que utilizam e as misturas respiratórias a que recorrem permitem que o perfil padrão determinado seja o mesmo. Tendo em conta que o presente estudo se encontra limitado a misturas EAN não é considerado o mergulho com recurso ao equipamento “*Viper Plus*” ou “*JJ-CCR*” que utilizam misturas HELIOX ou TRIMIX.

5. Análise dos perfis de mergulho com base no Mapa de Tecidos

A avaliação dos vários perfis de mergulho definidos no capítulo anterior será efetuada através da aplicação *open source* “*Subsurface*”. Uma grande vantagem desta aplicação é representação de um gráfico de cores que demonstra a saturação dos tecidos além de indicar textualmente o indicador “CNS” relativo à toxicidade do SNC.

5.1. Mapa de Tecidos

A aplicação “*Subsurface*” utiliza um esquema de cores para representar a saturação dos tecidos em que:

- Azul – Indica a saturação normal dos tecidos, em que uma tonalidade mais clara representa uma baixa saturação progredindo até às tonalidades mais escuras passando pelo roxo até atingir a cor preta;
- Preto – Fase de transição entre a saturação e a descompressão em que o tecido se encontra saturado à profundidade a que se encontra sujeito;
- Verde – Compartimento em descompressão, sugere níveis ligeiros de descompressão, geralmente seguro em que o risco de desenvolvimento de DD é reduzido ou desprezível;
- Amarelo – Compartimento a realizar descompressão mais próximo do *M-value*, apresenta um risco moderado de desenvolvimento de DD;
- Vermelho – Compartimento a realizar descompressão perto ou nos valores críticos de supersaturação (*M-value*), é a zona crítica onde existe um risco significativo de desenvolvimento de DD;

Com este modelo é possível realizar uma avaliação qualitativa do nível de saturação dos tecidos o que por sua vez permite definir se um perfil descompressivo é mais ou menos conservador que outro comparando os gráficos dos dois.

O mapa de tecidos representa ainda os vários compartimentos numa escala vertical em que as linhas superiores representam os compartimentos que saturam mais rápido e as inferiores os mais lentos.

Importa referir que a comparação dos perfis de mergulho à luz de cada algoritmo foi efetuada exclusivamente com recurso ao modelo da sobretensão dos tecidos de Haldane, não tendo sido considerado o modelo de bolhas.

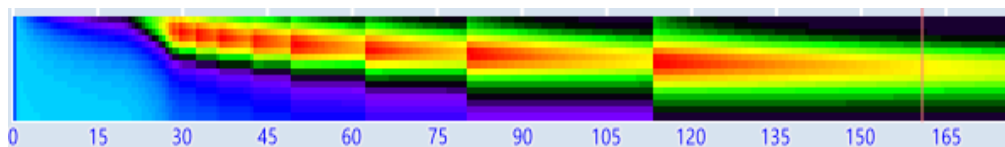


Figura 8-Mapa de tecidos

5.2. Destacamento de Mergulhadores Sapadores 1 e 3

Perfil de Mergulho A1

A figura 9 representa o perfil de mergulho A1 que corresponde a uma profundidade de 24 metros com um tempo de fundo de 20 minutos utilizando uma mistura respiratória com 60% de oxigénio e 40% de azoto (EAN60) em SCR com uma percentagem de oxigénio no *loop* de 40.7%. A EAD correspondente é de 18 metros.

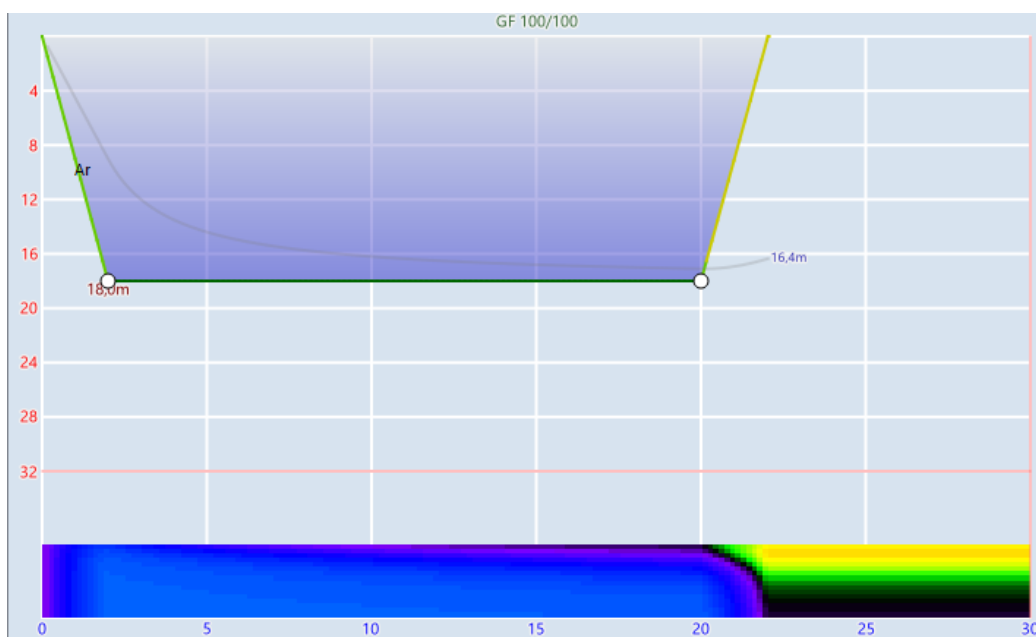


Figura 9-Perfil de Mergulho A1

Neste perfil a fase de transição entre a saturação e a decompressão ocorre na maioria dos compartimentos apenas com a chegada à superfície, excetuando apenas os compartimentos mais rápidos que iniciam a decompressão ainda durante a fase de subida, que atingem 52% do *M-value* à superfície. Os compartimentos mais lentos por

outro lado não chegam a entrar na fase de decompressão uma vez que a profundidade e o tempo de fundo não são suficientemente grandes para os saturar. O SNC calculado é de 3%.

Perfil de Mergulho B1

O perfil de mergulho B1 é representado pela figura 10. Este perfil tem uma profundidade máxima de 42 metros e um tempo de fundo de 20 minutos com recurso também a um SCR, no entanto, a percentagem de oxigénio no *loop* é de 28.4% pelo que a EAD para este perfil é de 39 metros.

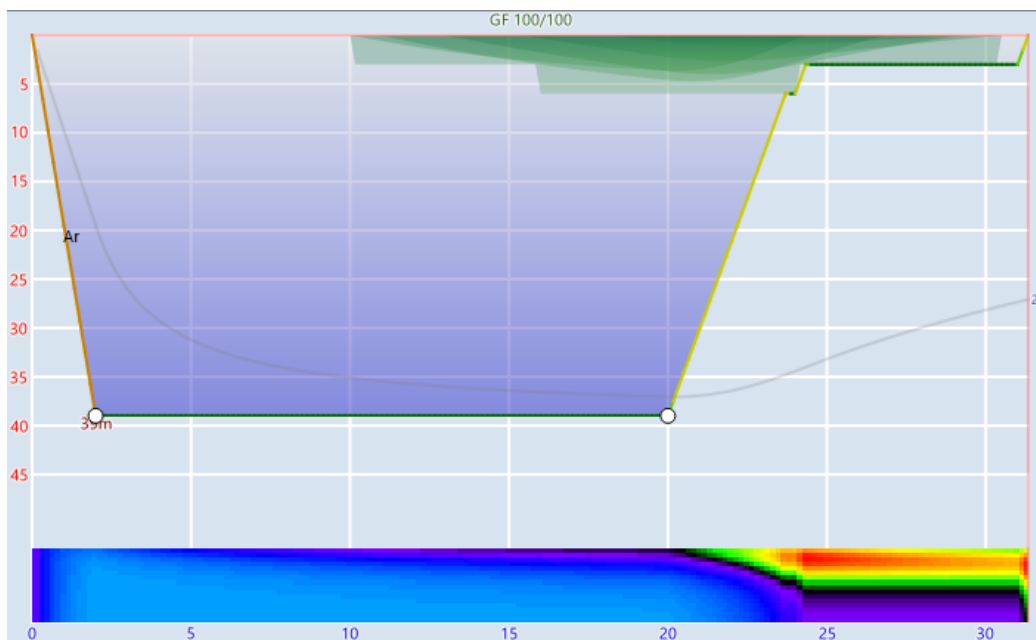


Figura 10-Perfil de Mergulho B1

O perfil B1 apresenta uma maior saturação, atingindo o valor de m-value aos 6 metros. Os compartimentos mais rápidos definem a totalidade do perfil de decompressão, uma vez que os mais lentos não chegam a saturar até ser atingida a superfície. Caso não sejam efetuados quaisquer patamares de decompressão os compartimentos mais rápidos atingem 131% de saturação. O SNC calculado é de 7%.

Perfil de Mergulho C1

O perfil de mergulho C1 encontra-se representado na figura 11. Este perfil mantém o tempo de fundo utilizado em A1 e B1, 20 minutos, mas tem uma profundidade maior, 54 metros. Utiliza uma percentagem de oxigénio de 32,5% e 67,5% de azoto num SCR com uma percentagem de oxigénio no *loop* de 24.9%. A EAD para este perfil de mergulho é 51 metros.

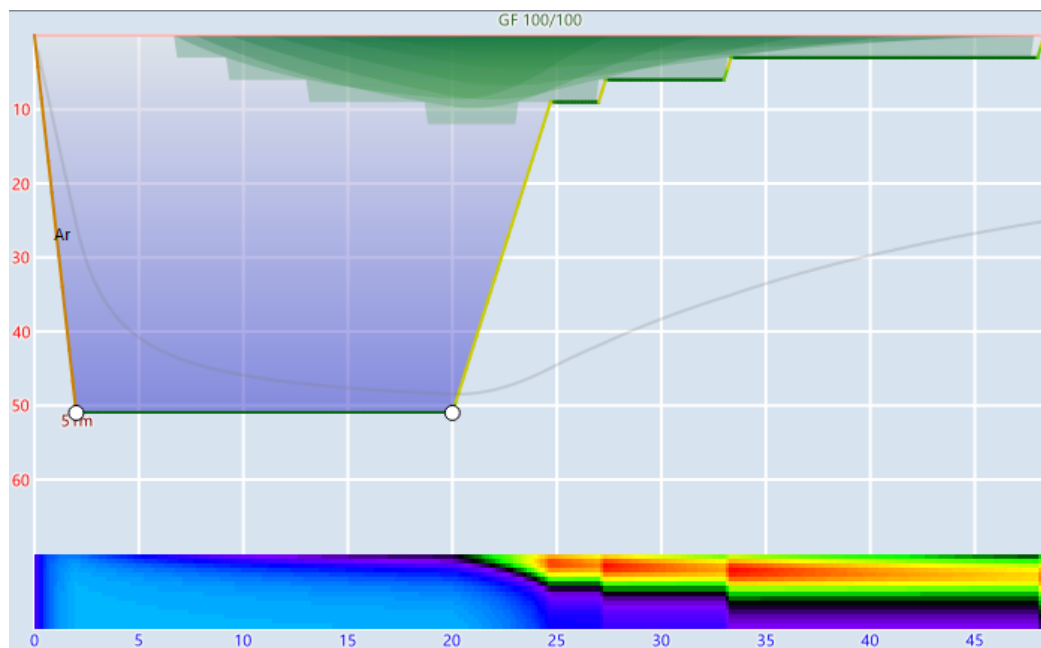


Figura 11-Perfil de Mergulho C1

Este perfil, de entre os definidos para o DMS 1 e 3 é o que mais satura os compartimentos, derivado das maiores profundidades. Assim como o perfil B1, também este perfil requer patamares de descompressão apesar de se utilizar um GF 100/100, neste caso três antes de atingir a superfície, caso sejam omitidos os compartimentos atingem mais de 150% do *M-value*. O SNC calculado é de 13%.

5.3. Destacamento de Mergulhadores Sapadores 2

Perfil de Mergulho A2

O perfil de mergulho A2, representado na figura 12, utiliza ar (21% oxigénio/79% azoto) num OC a uma profundidade de 12 metros com um tempo de fundo de 90 minutos.



Figura 12-Perfil de Mergulho A2

Neste perfil os tecidos mais rápidos começam a ficar saturados a partir dos 10 minutos, mas a quantidade de azoto não é suficiente para que a descompressão tenha que ser feita na água, quando aplicado um GF 100/100. O compartimento mais afetado atinge 69% de saturação. O SNC calculado é de 0%.

Perfil de Mergulho B2

O perfil B2, representado na figura 13, tem uma profundidade máxima de 18 metros e um tempo de fundo de 50 minutos com recurso também a OC e a uma mistura respiratória de ar.

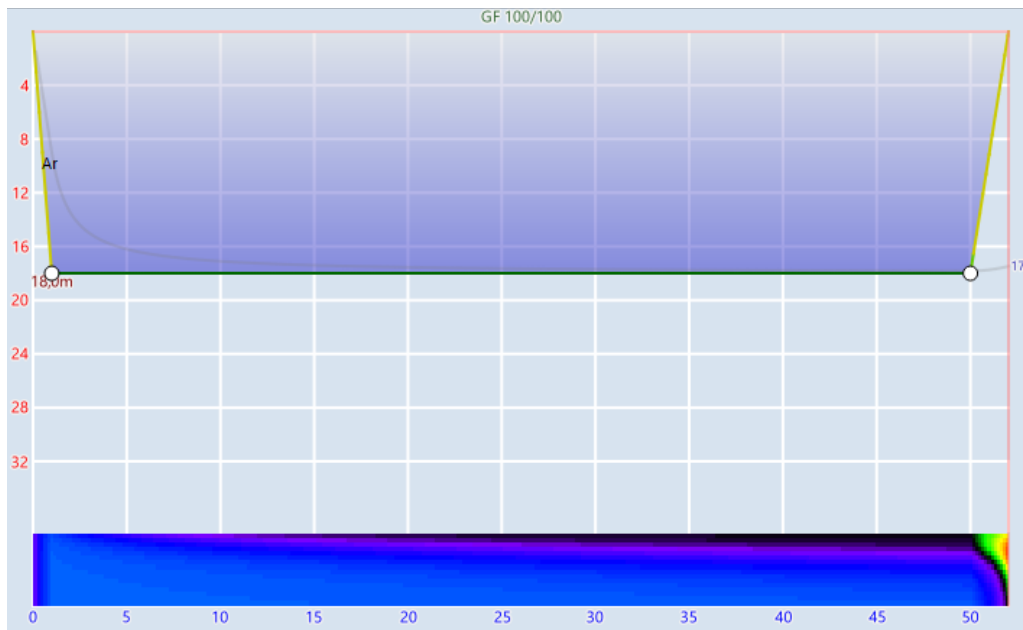


Figura 13-Perfil de Mergulho B2

Como se pode observar na figura 13 o perfil B2 é ligeiramente mais agressivo do que o perfil A2. O compartimento mais afetado pelo perfil praticado atinge 89% de saturação à superfície comparado ao *M-value*. O SNC calculado é de 7%.

Perfil de Mergulho C2

O perfil de mergulho C2, na figura 14, utiliza também um OC com uma mistura respiratória EAN 33. Tem uma profundidade máxima de 30 metros e um tempo de fundo de 40 minutos. A EAD é de 24 metros.

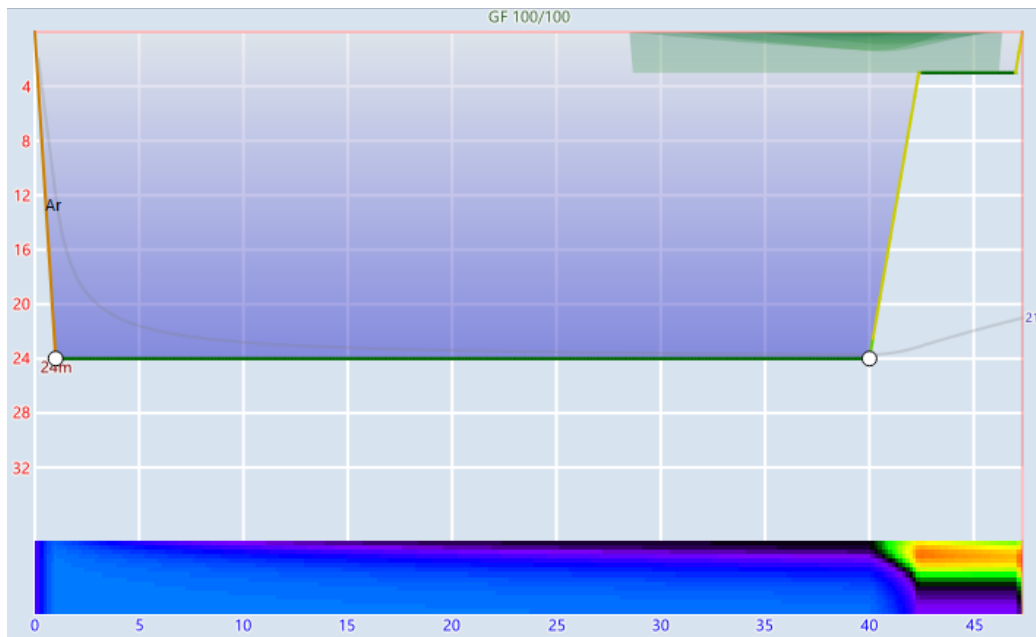


Figura 14-Perfil de Mergulho C2

O perfil C2 apresenta um mapa de tecidos que demonstra um nível mais elevado de saturação quando comparado aos perfis A2 e B2. Os compartimentos mais rápidos atingem o *M-value* aos 3 metros de profundidade durante a subida pelo que se revela necessário efetuar um patamar de decompressão neste momento. Se não for efetuado nenhum patamar de decompressão os compartimentos mais afetados atingem 110% de saturação à superfície. O SNC calculado é de 7%.

Perfil de Mergulho D2

O perfil de mergulho D2, representado na figura 15, tem uma profundidade máxima de 39 metros e 30 minutos de tempo de fundo. Utiliza um sistema de OC, mas com uma mistura respiratória EAN 28. A EAD correspondente a este perfil é de 35 metros.

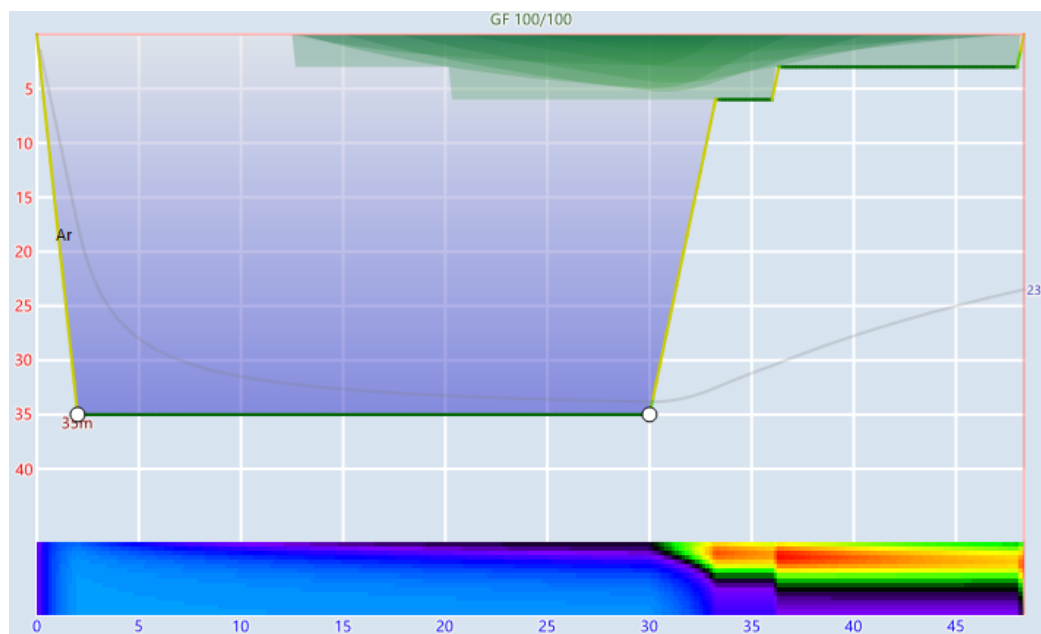


Figura 15-Perfil de Mergulho D2

O perfil D2 apresenta um perfil descompressivo mais complexo devido à maior profundidade, apesar de ter um menor tempo de fundo. Neste perfil os compartimentos atingem o *M-value* aos 6 metros, necessitando ainda de um segundo patamar de descompressão antes de atingir a superfície. Os compartimentos mais rápidos, caso não realizem qualquer patamar de descompressão atingem 146% de saturação ao atingir a superfície. O SNC calculado é de 9%.

Perfil de Mergulho E2

O perfil E2, representado na figura 16, utiliza um OC com ar a uma profundidade de 51 metros. O tempo de fundo deste perfil é de 10 minutos.

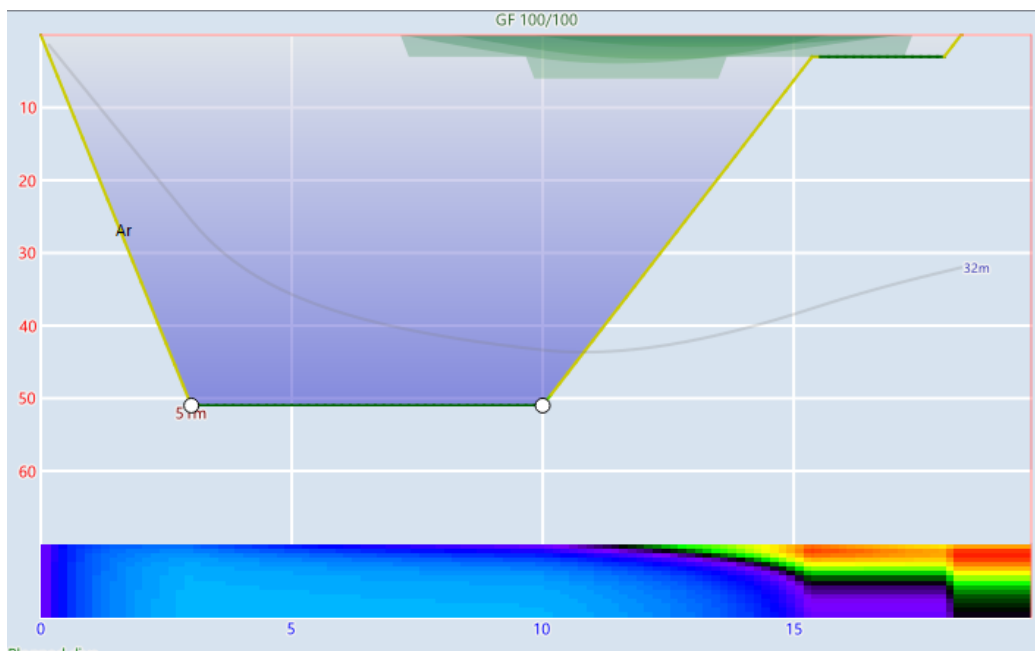


Figura 16-Perfil de Mergulho E2

O perfil E2, apesar de ser o perfil mais profundo não é o que mais satura os compartimentos, devido ao reduzido tempo de fundo. Utilizando o GF 100/100 requer um patamar de descompressão aos 3 metros, caso este patamar seja omitido os compartimentos mais rápidos atingem 111% do valor de *M-value* à superfície. O SNC calculado é de 6%.

6. Integração de Dados

A aplicação “Subsurface” utiliza por base a teoria de *Dissolved Gas Models*, e utiliza por defeito os algoritmos de descompressão Bühlmann ou VPM-B, mas pode emular outros algoritmos através das tabelas de mergulho das mesmas manipulando os GF associados e os patamares de descompressão. Por esta razão o algoritmo Bühlmann ZHL-16C com um GF 40/85 será utilizado como standard ao qual todos os restantes serão comparados. A escolha deste GF advém da utilização comum e da recomendação por parte dos fornecedores de equipamentos que utilizam computadores de mergulho com este algoritmo. No entanto, o algoritmo de Bühlmann oferece a possibilidade de alterar o GF conforme o nível de conservadorismo que se pretender.

6.1. Integração dos Perfis de Mergulho com os Algoritmos

Perfil de Mergulho A1

A aplicação dos algoritmos Bühlmann ZHL-16C, DCIEM e US NAVY ao perfil de mergulho A1 não tem diferenças significativas em termos de perfil de descompressão visto que neste mergulho, em qualquer um dos três algoritmos, é permitida uma subida direta até à superfície. A única diferença entre os três perfis descompressivos é a velocidade de subida, e mesmo esta não tem um impacto significativo no perfil descompressivo, como pode ser observado na figura 17.

profundidade	duração	runtime	gás	profundidade	duração	runtime	gás	profundidade	duração	runtime	gás
↘ 18m	1min	1min	ar	↘ 18m	1min	1min	ar	↘ 18m	1min	1min	ar
→ 18m	19min	20min		→ 18m	19min	20min		→ 18m	19min	20min	
↙ 0m	1min	21min		↙ 0m	2min	22min		↙ 0m	2min	22min	
CNS: 0% OTU: 0 A1-DCIEM				CNS: 0% OTU: 0 A1-USNAVY				CNS: 0% OTU: 0 A1-ZHL-16C			

Figura 17-Algoritmos Aplicados ao Perfil A1

Perfil de Mergulho B1

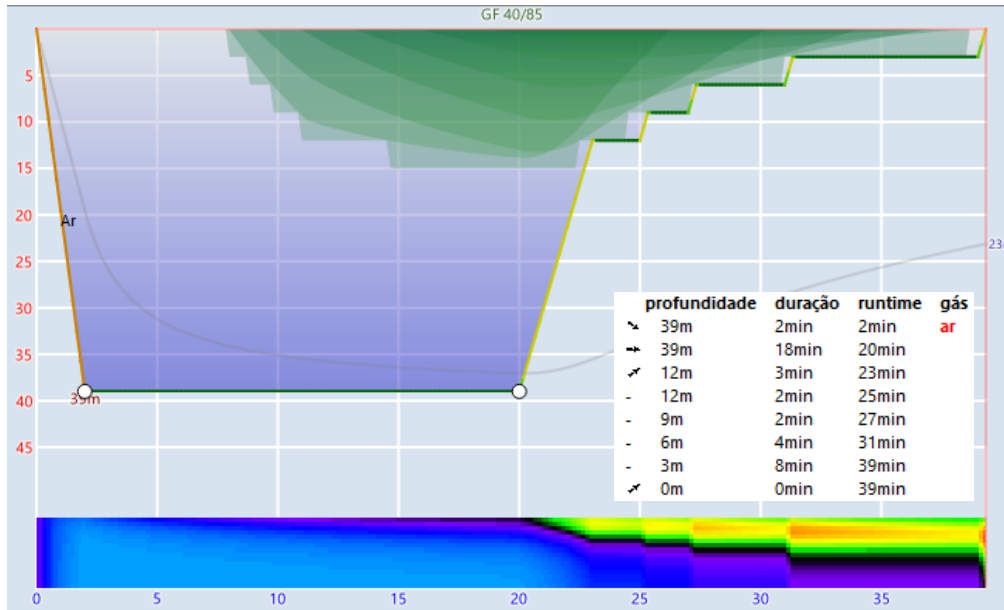


Figura 18-B1 Bühlmann

A figura 18 apresenta o perfil B1 sujeito ao algoritmo Bühlmann ZHL-16C com um GF 40/85. O perfil de descompressão determinado tem quatro patamares de descompressão com 5 minutos aos 12 metros, 2 minutos aos 9 metros, 4 minutos aos 6 metros e 8 minutos aos 3 metros, podendo depois subir até à superfície. Com um tempo total de descompressão de 19 minutos.

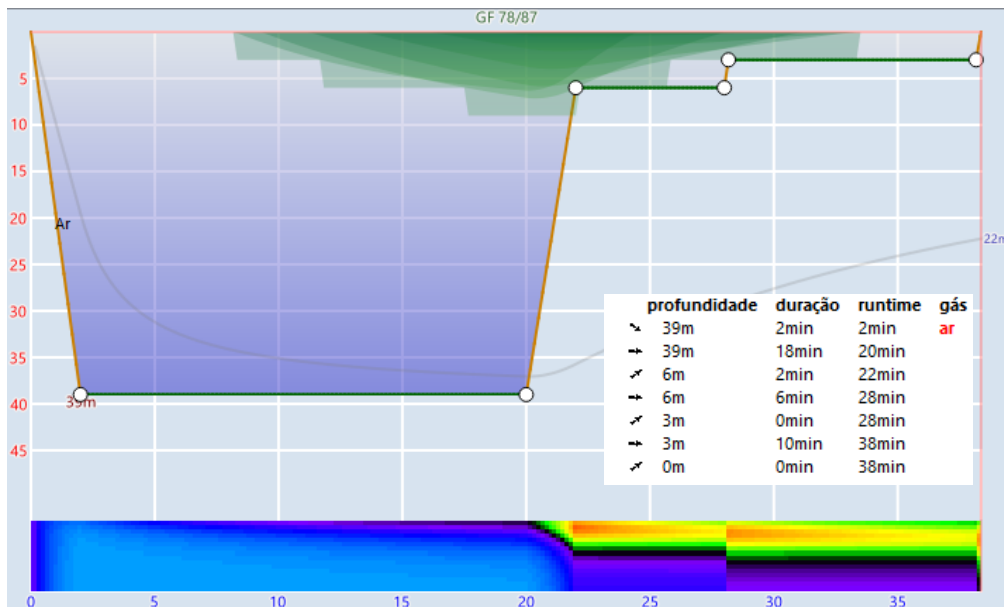


Figura 19-B1 DCIEM

Quando o algoritmo DCIEM é aplicado ao perfil de mergulho B1 são definidos apenas 2 patamares de descompressão, como se vê na figura 19. Um primeiro aos 6 metros durante 8 minutos e um segundo aos 3 metros durante 10 minutos, totalizando 18 minutos de descompressão. Se se pretender associar um GF do algoritmo Bühlmann a este perfil de descompressão definido pelo algoritmo DCIEM o mais aproximado será o GF 78/87.

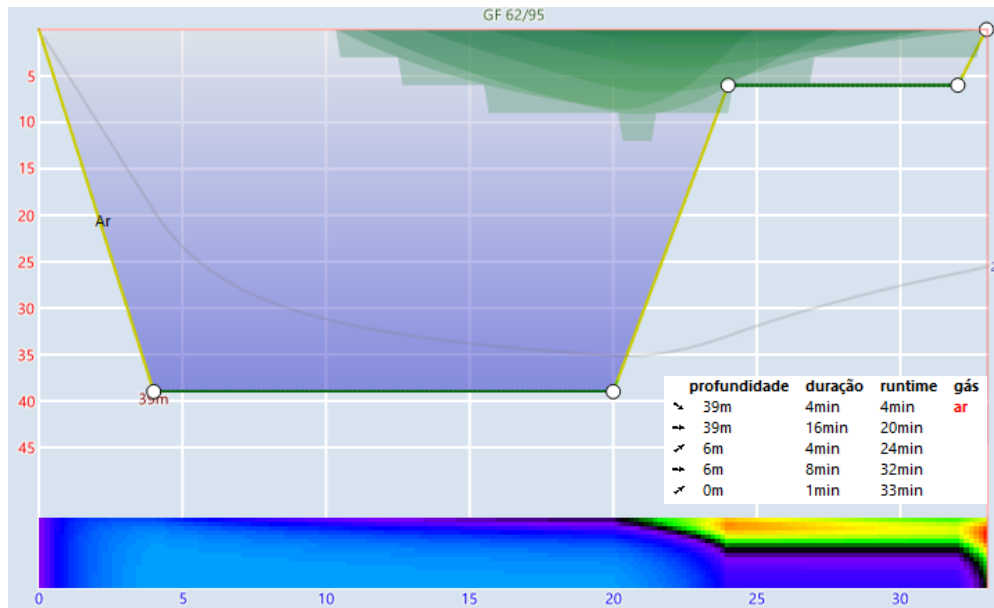


Figura 20-B1 USNAVY

Na figura 20 está representado o algoritmo USNAVY aplicado ao perfil B1. As tabelas deste algoritmo não possuem a profundidade 39 msw (127.9 fsw), têm apenas 36.6 msw (120fsw) e 39.6 msw (130 fsw) pelo que se torna necessário arredondar para o valor mais alto, 39.6 msw. Nesta profundidade o algoritmo determina apenas um patamar de descompressão aos 6 metros durante 8 minutos, que somado ao tempo de subida totaliza cerca de 13 minutos de descompressão. O GF de Bühlmann equivalente a este perfil de descompressão é GF 62/95.

Perfil de Mergulho C1

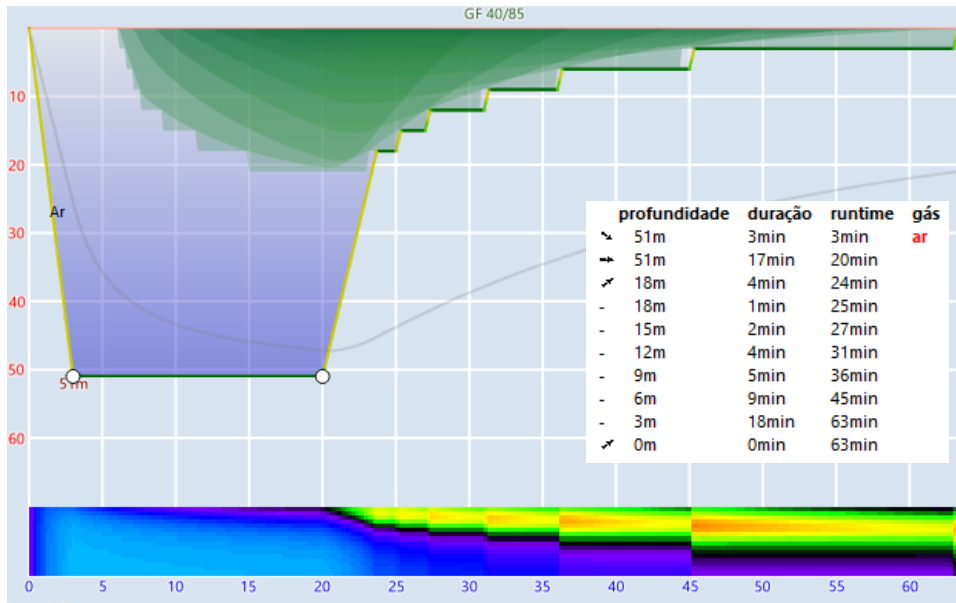


Figura 21-C1 Bühlmann

O algoritmo Bühlmann aplicado ao perfil C1, como mostra a figura 21, define seis patamares de descompressão: 5 minutos aos 18 metros, 2 minutos aos 15 metros, 4 minutos aos 12 metros, 5 minutos aos 9 metros, 9 minutos aos 6 metros e 18 minutos aos 3 metros com um total de 43 minutos de descompressão.

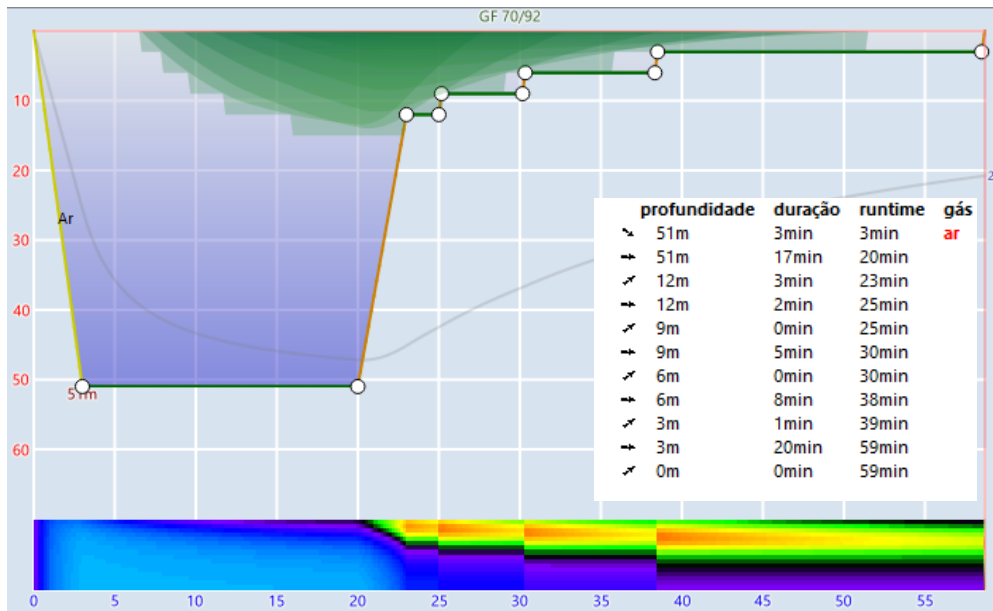


Figura 22-C1 DCIEM

Com o algoritmo DCIEM aplicado ao perfil C1, representado na figura 22, são determinados quatro patamares de descompressão, aos 12, 9, 6 e 3 metros com 5 minutos aos 12 e aos 9 metros, 8 aos 6 metros e 20 minutos aos 3, com um total de 39 minutos de descompressão. O GF do algoritmo Bühlmann que mais se assemelha a este perfil de descompressão é o GF 70/92.

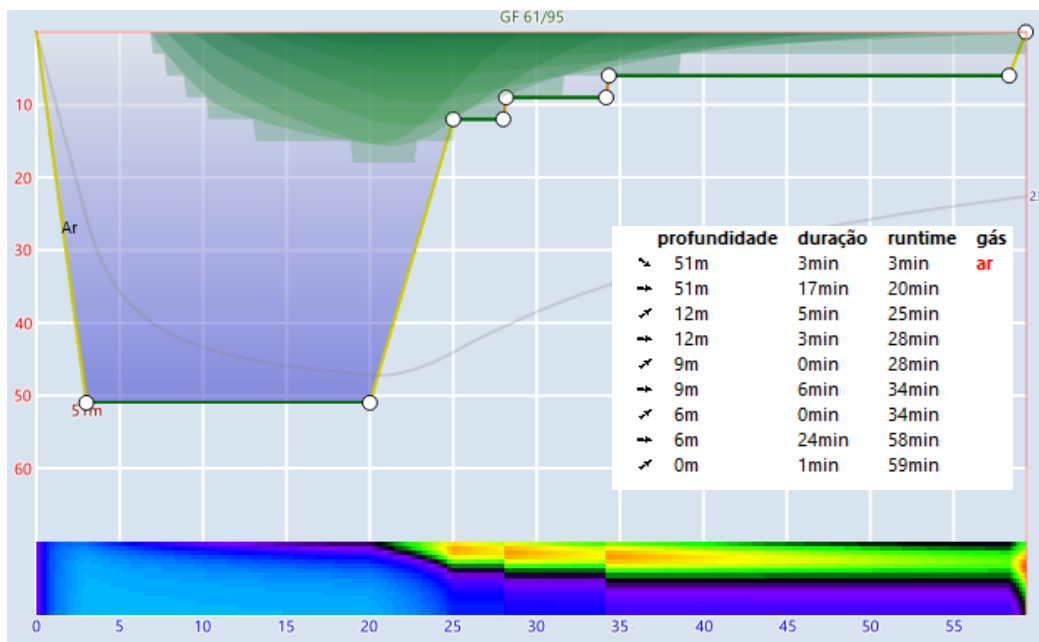


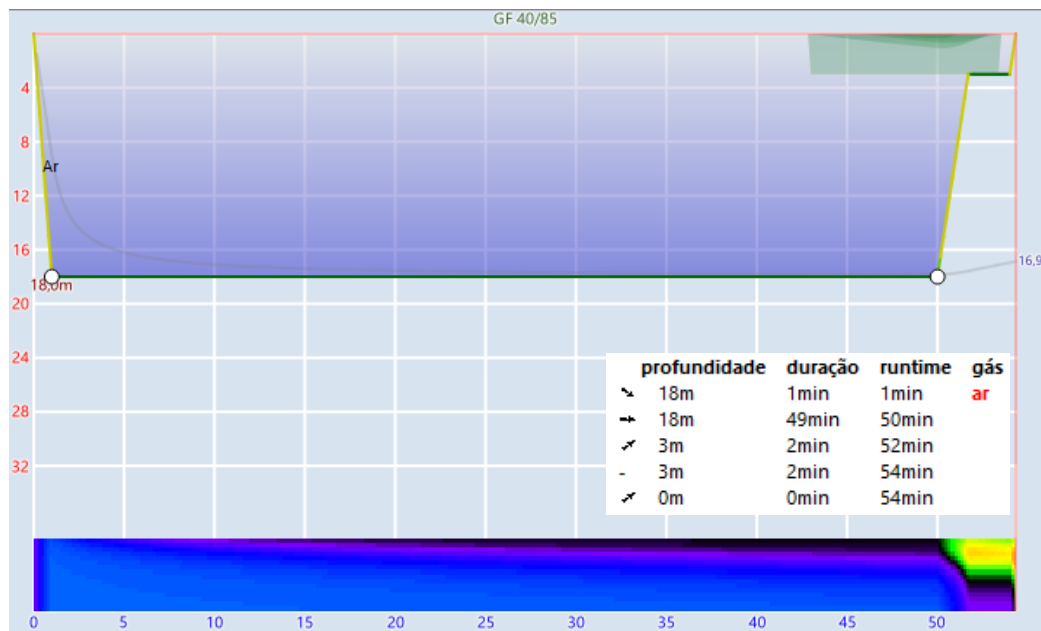
Figura 23-C1 USNAVY

Tal como no perfil B1, o algoritmo USNAVY não tem todas as profundidades discriminadas. No caso do perfil C1, representado pela figura 23, estão apenas definidas as profundidades 160 e 170 fsw, que correspondem a 48,7 e 51,8 msw. Utiliza-se, portanto, o mais profundo 170 fsw que define três patamares, após uma subida que deverá demorar cerca de 4 minutos e 20 segundos dos 51 aos 12 metros (40 fsw). Atingindo os 12 metros, o mergulhador deverá permanecer nesta profundidade por 3 minutos, devendo depois subir até aos 9 metros (30 fsw) e manter esta profundidade durante 6 minutos, o último patamar será aos 6 metros (20 fsw) durante 24 minutos. O tempo total de descompressão é de 39 minutos. O GF equivalente é 61/95.

Perfil de Mergulho A2

Assim como o perfil A1 também o perfil A2 permite uma subida direta à superfície em qualquer um dos três algoritmos estudados. Devido à baixa profundidade mesmo os tempos de subida respetivos têm um impacto muito pouco significativo na descompressão ou no perfil completo do mergulho.

Perfil de Mergulho B2



Ao perfil B2 quando aplicado o algoritmo Bühlmann, como representado na figura 24, é definido apenas um patamar de descompressão aos 3 metros durante 2 minutos, podendo depois subir diretamente para a superfície. Somando o tempo de subida, o tempo total de descompressão é de 4 minutos.

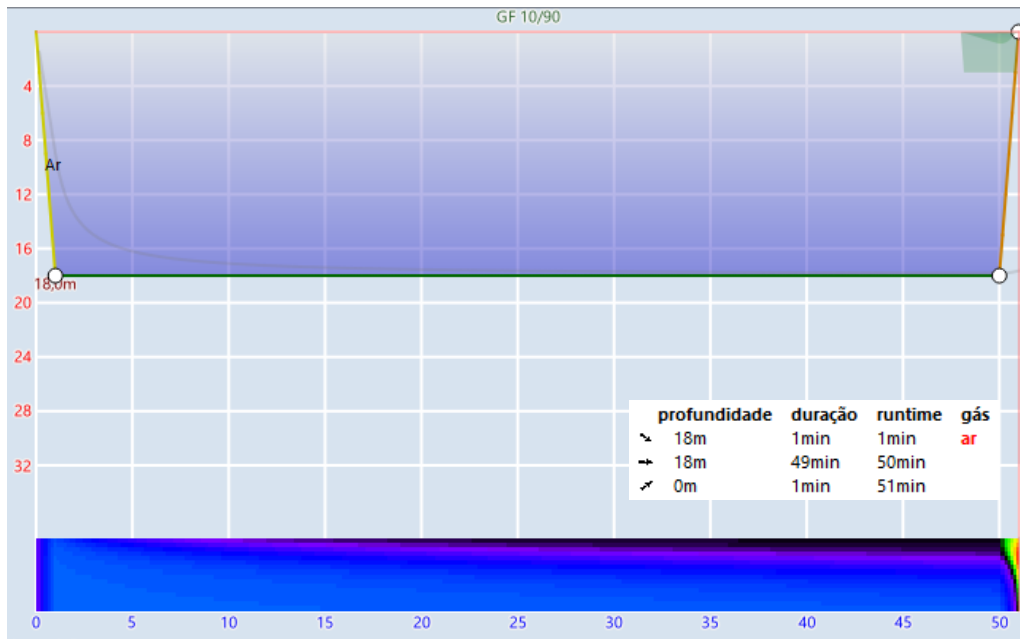


Figura 25-B2 DCIEM

Quando o algoritmo DCIEM é aplicado ao perfil B2 obtém-se um perfil de descompressão que permite uma subida direta à superfície. Nas tabelas deste algoritmo apesar de não ser determinado nenhum patamar é referido que o tempo total de descompressão é de 1 minuto. O GF que corresponde a este perfil de mergulho é 10/90.

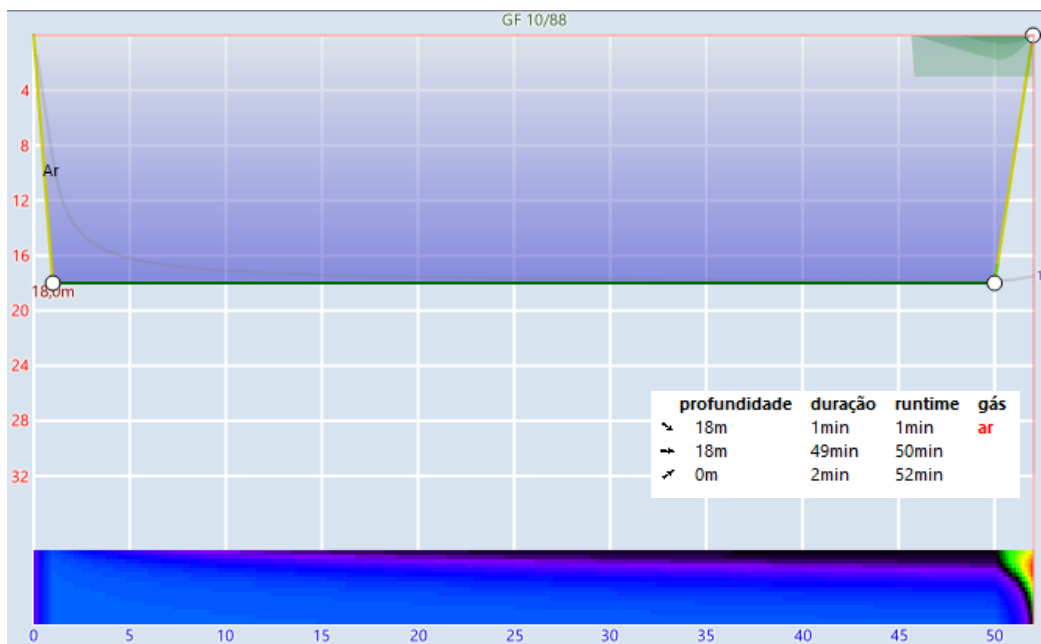


Figura 26-B2 USNAVY

Assim como no algoritmo DCIEM, também com o algoritmo da USNAVY é permitida uma subida direta à superfície, com a diferença de, neste caso, não ser definido nenhum tempo de subida, pelo que devem ser respeitados os tempos base de 9 metros por minuto (30 fsw por minuto), de onde se totalizam 2 minutos ($18/9=2$). Não existindo o valor 18 metros (59 fsw) nas tabelas da USNAVY utilizou-se o valor seguinte, 60 fsw que corresponde aos 18,3 metros. O GF equivalente a este perfil será o GF 10/88.

Perfil de Mergulho C2

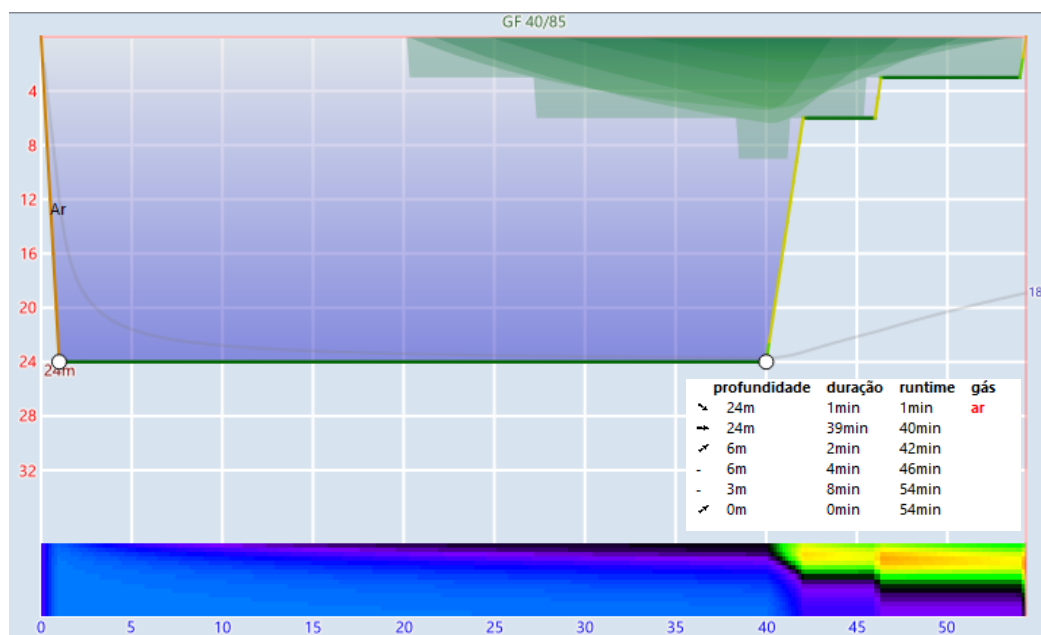


Figura 27-C2 Bühlmann

O algoritmo Bühlmann define, para o perfil C2, dois patamares de descompressão, 6 minutos aos 6 metros e 8 minutos aos 3 metros, totalizando 14 minutos de descompressão.

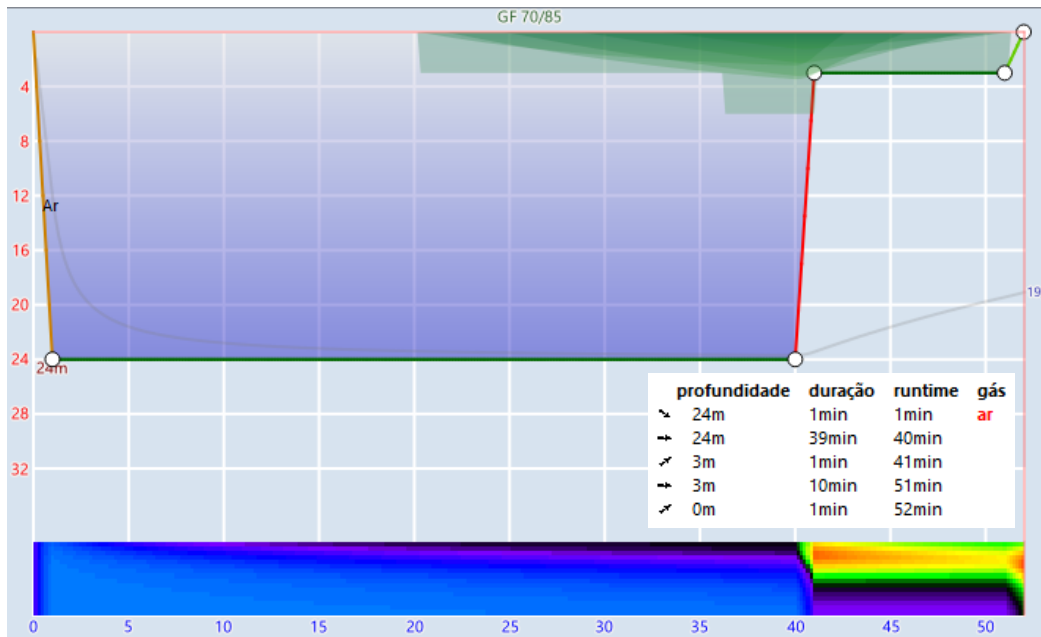


Figura 28-C2 DCIEM

Neste perfil, aplicando o algoritmo DCIEM, como mostra a figura 28, é definido um patamar de descompressão aos 3 metros durante 11 minutos. O GF que melhor se aplica a este perfil é 70/85.

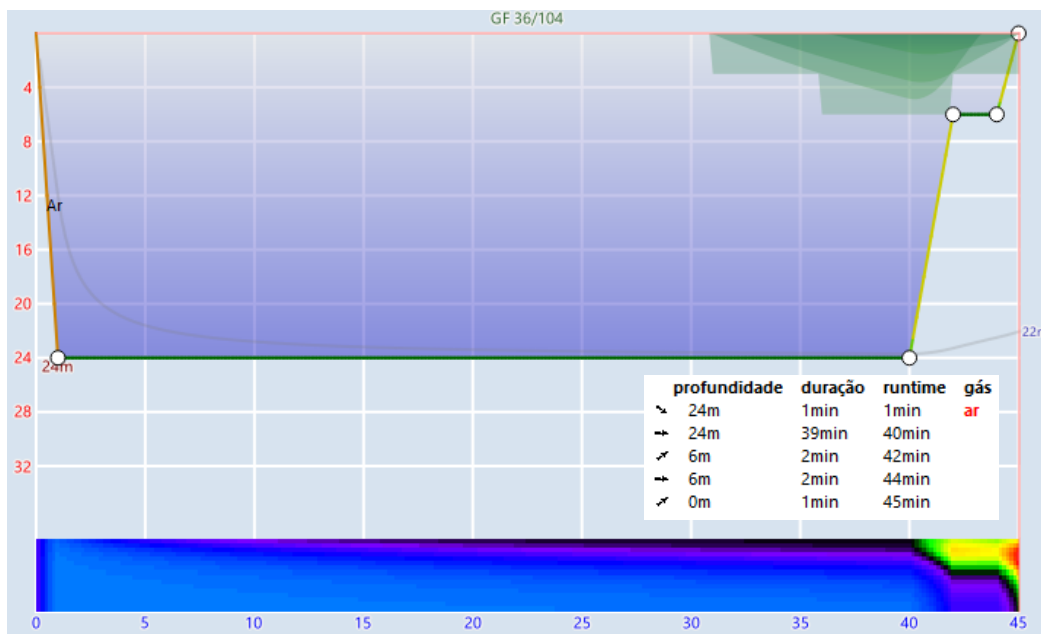


Figura 29-C2 USNAVY

O algoritmo US NAVY define apenas um patamar aos 6 metros durante 2 minutos após uma subida de também 2 minutos dos 24 metros até este patamar. O GF equivalente a este perfil é 36/104. O valor de GF (*high*) excede o *M-value*.

Perfil de Mergulho D2

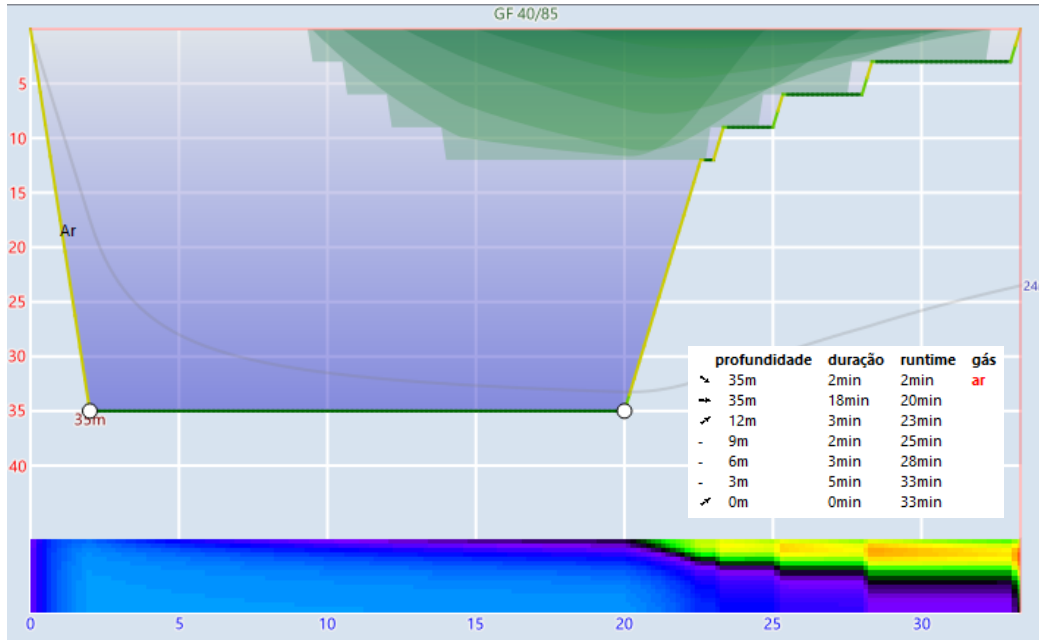


Figura 30-D2 Bühlmann

O algoritmo de Bühlmann estipula, para o perfil D2 representado pela figura 30, quatro patamares de decompressão. O primeiro aos 12 metros durante 3 minutos, seguido de 2 minutos aos 9 metros, 3 minutos aos 6 metros e 5 minutos aos 3 metros, com um total de 13 minutos.

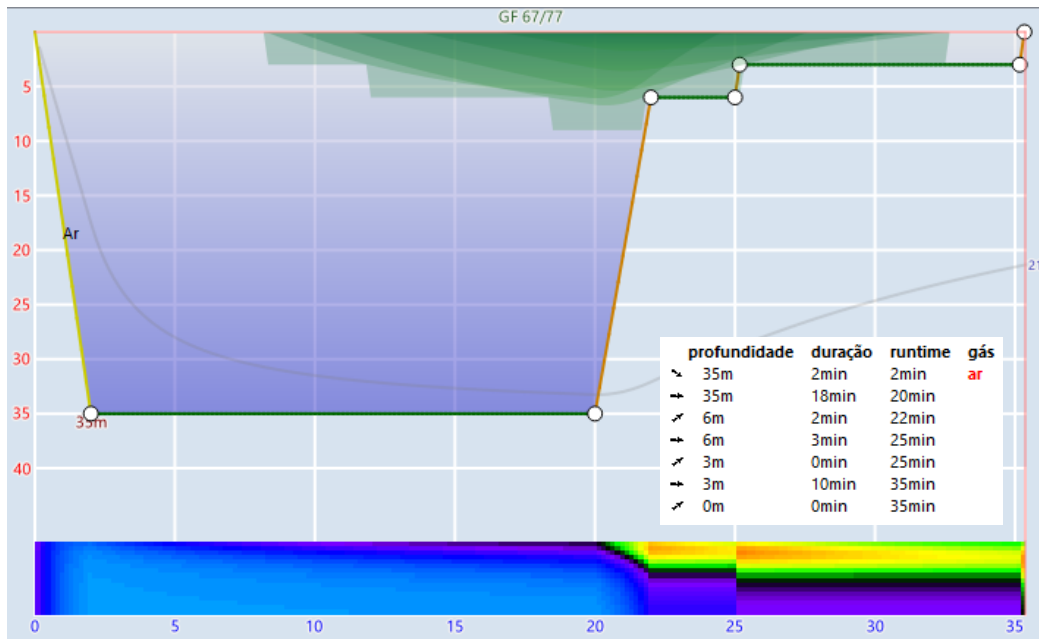


Figura 31-D2 DCIEM

Com o algoritmo DCIEM, aplicado ao perfil D2 são definidos dois patamares de decompressão, como se pode ver na figura 31. Estes patamares encontram-se aos 6 e 3 metros com 5 e 10 minutos, respetivamente, e com um período total de decompressão de 15 minutos. O GF que mais se aproxima deste perfil de decompressão é o GF 67/77.

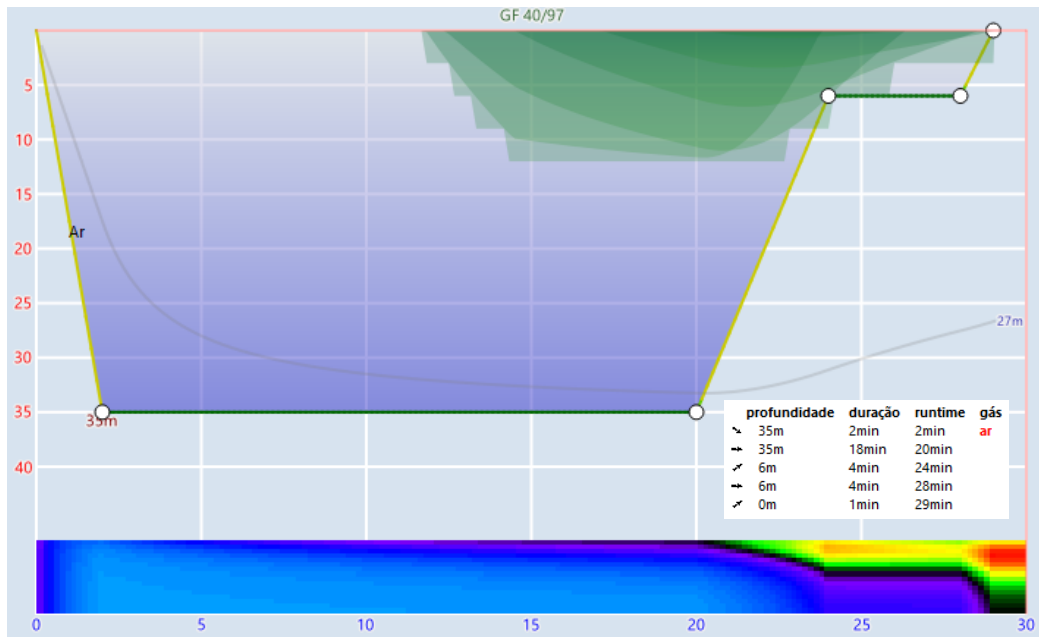


Figura 32-D2 USNAVY

O perfil D2, quando submetido ao algoritmo USNAVY, requer um patamar de decompressão aos 6 metros durante 4 minutos após os 4 minutos de subida, totalizando 8 minutos. O GF equivalente a este perfil de decompressão é o GF 40/97.

Perfil de Mergulho E2

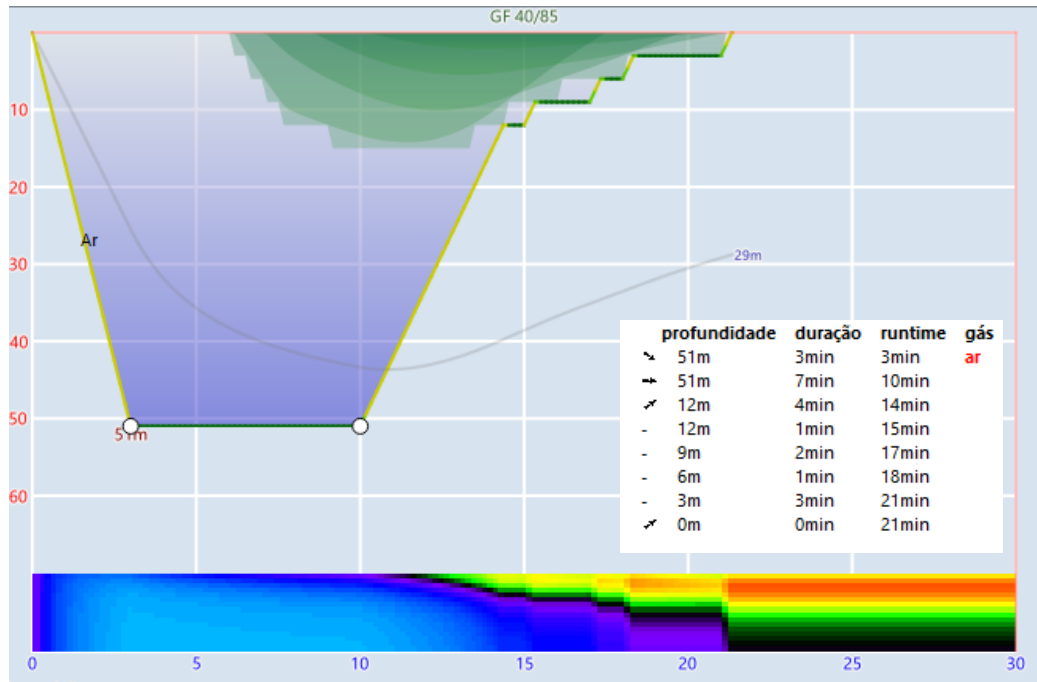


Figura 33-E2 Bühlmann

O algoritmo Bühlmann, com o GF 40/85, define quatro patamares de decompressão para o perfil E2 com 5 minutos aos 12 metros, 2 minutos aos 9 metros, 1 minuto aos 6 metros e 3 minutos aos 3 metros, com um total de 11 minutos de decompressão e uma tensão tecidual relativamente elevada. No entanto, se o GF (*high*) for reduzido de 85 para 77, o tempo de decompressão total aumenta para 24 minutos, mas a tensão tecidual reduz.

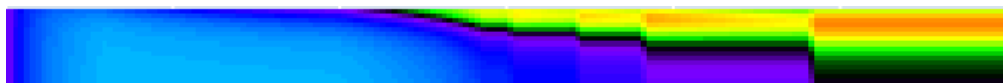


Figura 34-Mapa de Tecidos E2 Bühlmann GF 40/77

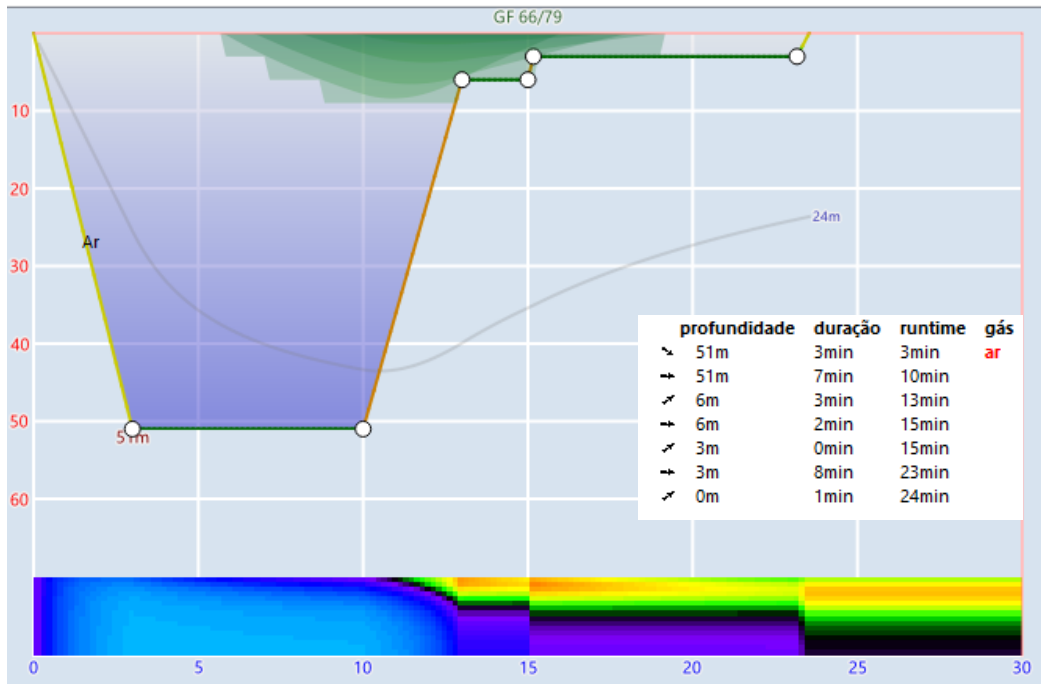


Figura 35-E2 DCIEM

Com o algoritmo DCIEM este perfil passa a recorrer apenas a 2 patamares de descompressão aos 6 e aos 3 metros com 5 e 8 minutos, respetivamente. O tempo total de descompressão é, portanto, de 13 minutos. O GF equivalente a este perfil é 66/79.

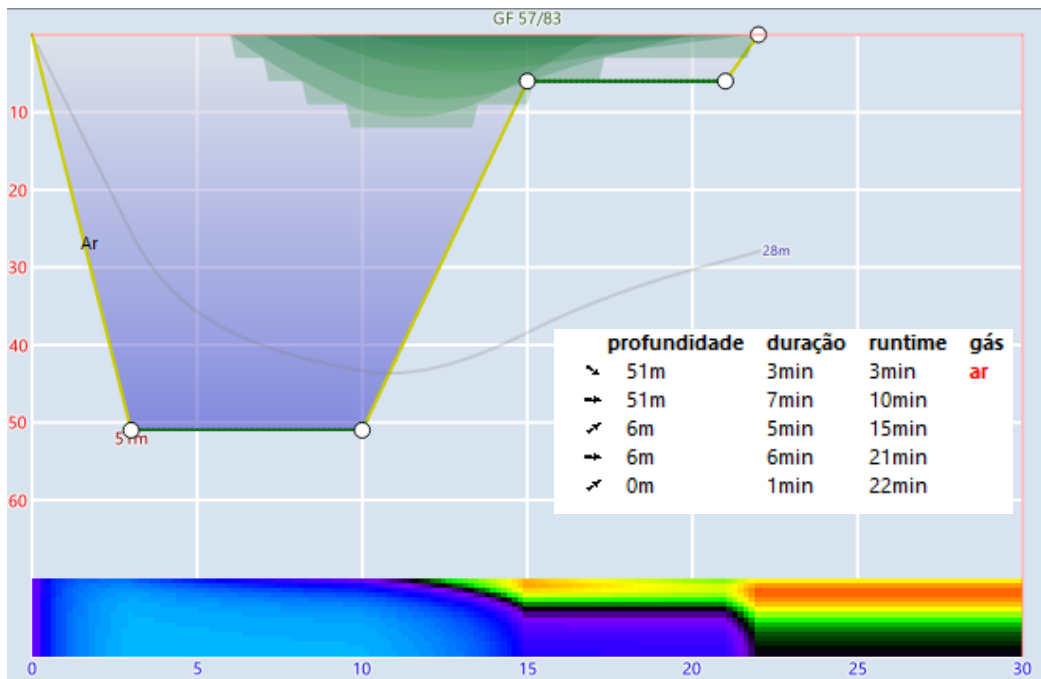


Figura 36-E2 USNAVY

Com o algoritmo da USNAVY, será necessário utilizar a profundidade 170 fsw (51,8 msw). O algoritmo define para esta profundidade e tempo de fundo apenas um patamar de decompressão aos 6 metros durante 6 minutos, contando com um tempo de subida de 5 minutos até esta profundidade. Manipulando o GF para se adaptar a este perfil de decompressão obtém-se o GF 57/83.

6.2. Análise de Resultados

Compilando os dados do subcapítulo 6.1 obtém-se a tabela presentes no apêndice. A tabela encontra-se dividida em 7 colunas e 8 linhas principais. Estas linhas representam os perfis de mergulho que depois se subdividem entre os três algoritmos definidos. As primeiras três colunas definem as características dos perfis de mergulho e o algoritmo utilizado e as quatro seguintes discriminam as características do perfil de decompressão. Os elementos destas quatro últimas colunas são os seguintes:

- Patamares – Indica o número de patamares de decompressão requerido no perfil de decompressão determinado;
- Tempo Deco – Indica o tempo total de decompressão em minutos;
- Tensão Tecidual – é uma escala de cores que ordena os perfis de decompressão entre o menos agressivo (verde), intermédio (amarelo) e o mais agressivo (vermelho) para os compartimentos, tendo em conta o mapa de tecidos;
- GF (*low/high*) – Indica o GF equivalente ao perfil de decompressão utilizado.

Analisando os cinco fatores caracterizantes acima referidos inferem-se os seguintes resultados.

O algoritmo Bühlmann é um perfil mais conservador na sua generalidade. Nos perfis menos agressivos, é o que oferece um stress descompressivo menor. Por norma, este algoritmo, utiliza sempre mais patamares de decompressão independentemente de o perfil ser mais ou menos agressivo. O tempo de decompressão é relativamente semelhante nos vários algoritmos, no entanto, nos perfis menos agressivos, é o

algoritmo Bühlmann que tem os períodos mais longos de descompressão. Nos perfis intermédios recorre a um primeiro patamar de descompressão mais profundo. O GF (*high*) deste perfil é sempre o mais baixo em qualquer um dos perfis pelo que é aquele que menos se aproxima do *M-value*. Existem, no entanto, casos em que isto não se verifica. No perfil E2, com o GF 40/85, o algoritmo de Bühlmann tem o menor tempo de descompressão, mas é também o algoritmo que apresenta uma maior tensão tecidual, pelo que se opta por uma redução do GF (*high*) por forma a reduzir a sua tensão tecidual em sacrifício do tempo de descompressão. A grande vantagem deste algoritmo prende-se na sua elevada capacidade de personalização, apesar de se utilizar por convenção um GF específico nada impede o mergulhador de alterar um ou outro valor por forma a aumentar a segurança na descompressão, ou a reduzir o tempo de permanência na água.

O algoritmo DCIEM, em todos os perfis mantém um nível intermédio nos fatores stress descompressivo, número de patamares e tempos de descompressão. No entanto, relativamente aos GF existem já algumas diferenças. O primeiro patamar de descompressão, definido pelo GF (*low*), encontra-se, na maioria dos perfis, bastante mais tarde do que nos outros algoritmos, a exceção encontra-se nos perfis menos agressivos em que define bastante mais cedo. O GF (*high*), por outro lado, aproxima-se bastante dos valores de Bühlmann (GF (*high*) – 85).

Nos perfis de descompressão definidos pelo algoritmo da USNAVY, o stress descompressivo é relativamente alto na maioria dos perfis, excetuando apenas o perfil mais agressivo, C1, em que apresenta a descompressão mais segura para os compartimentos. Este algoritmo, prioriza a redução de perfis ao mínimo possível tomando partido dos tempos de subida, que em vários casos igualam o tempo de descompressão no patamar. Em todos os perfis, exceto o C1, é utilizado apenas um patamar de descompressão, aos 6 metros de profundidade. Ainda assim, tanto nos perfis menos agressivos, como nos mais agressivos utiliza os menores tempos de descompressão. Em perfis intermédios o tempo de descompressão é relativamente semelhante aos outros dois algoritmos. O GF (*high*) neste perfil é em todos os perfis

bastante elevado, chegando num caso específico, no perfil C2 a ultrapassar o valor do *M-value* definido em 4 pontos percentuais, tendo em conta que este não é um perfil relativamente agressivo quando comparado aos restantes perfis definidos.

7. Conclusões e Investigação Futura

7.1. Conclusões

Os algoritmos de descompressão são um elemento essencial para manter a segurança do mergulho, mas cada um tem diferentes pressupostos e modos de funcionamento, pelo que a escolha daquele que melhor se adequa vai depender do tipo de mergulho que se faça. Assim, com o presente estudo pretendeu-se definir primeiro de que forma é feito o mergulho na Marinha Portuguesa e de seguida seleccionar os algoritmos de descompressão que de uma forma ou outra possam ser aplicados a este ramo das Forças Armadas.

Foram definidos oito perfis de mergulho que representam o espectro de operações dos três Destacamentos de Mergulhadores Sapadores no seu aspeto mais agressivo. Três dos oito representam o DMS 1 e 3 e são definidos pelos limites impostos pela NATO para o mergulho com EAN (NATO, 2020), os restantes cinco representam o DMS 2 e foram definidos em consulta com o Comandante do Agrupamento de Mergulhadores e com o Comandante do DMS 2, tendo em conta o tipo de operações que este Destacamento executa.

A integração dos algoritmos de descompressão com os perfis de mergulho definidos permitiu uma análise da forma como estes algoritmos funcionam e das prioridades que definem. O algoritmo Bühlmann, utilizando um GF 40/85, é um algoritmo mais conservador em comparação com os restantes, pelo que existe uma maior garantia de segurança na totalidade do espectro de operações realizadas com este, no entanto, existem exceções. Em perfis mais agressivos como o perfil E2 pode tornar-se um algoritmo com mais impacto na tensão tecidual, pelo que a elevada capacidade de personalização se mostra útil uma vez que pode alterar o tempo de fundo ou o nível dos patamares de forma a reduzir a agressividade da descompressão para os tecidos com o intuito de a tornar este algoritmo tão seguro como em qualquer outro perfil. O algoritmo USNAVY prioriza a utilização de menos patamares e de períodos de descompressão na sua totalidade mais curtos, pelo que também é o que apresenta uma maior propensão ao risco de desenvolvimento de DD. O algoritmo

DCIEM, atualmente em uso pelos mergulhadores da Marinha Portuguesa na maioria dos seus empenhamentos, estabelece um compromisso entre o conservadorismo do algoritmo Bühlmann e a velocidade de descompressão do algoritmo da USNAVY sendo, em quase todos os fatores, o meio termo entre os dois.

A nível prático, perceber as implicações que a utilização de um ou outro algoritmo tem para o mergulho realizado permite um maior controlo sobre que riscos podem ser tomados sem prejuízo de entrar em desequilíbrio com os objetivos que se pretendem atingir. Numa perspetiva teórica, a análise efetuada neste estudo permite um mais informado planeamento do mergulho através da escolha do algoritmo que melhor satisfaça os requisitos definidos para a tarefa a realizar.

Por forma a manter este estudo claro e conciso, foi necessário limitar alguns fatores. A utilização de hélio ou outros gases não foi tida em conta, o que descarta processos como a contradifusão isobárica. Não foram utilizados todos os algoritmos de descompressão existentes devido ao elevado número existente e à dificuldade de acesso de alguns.

Assim, com o presente estudo, desenvolveu-se uma análise dos algoritmos de descompressão associando estes aos perfis de mergulho dos mergulhadores da Marinha Portuguesa. Desta forma obtendo uma caracterização detalhada e permitindo uma melhor e mais completa tomada de decisão no que diz respeito à utilização de algoritmos de descompressão.

7.2. Investigação Futura

As limitações impostas no presente estudo, apresentam-se agora como propostas de trabalhos futuros. O desenvolvimento do mesmo estudo, mas tendo em conta a utilização de misturas TRIMIX ou HELIOX seria de grande interesse, tendo em conta a maior personalização da descompressão e os fatores em que o risco aceitável seja maior ou menor.

O estudo do comportamento fisiológico do corpo nestas condições seria também de grande interesse, perceber de que forma fatores como a temperatura da água, a idade do mergulhador, o nível de hidratação durante o mergulho e outros que se sabem afetar a velocidade de descompressão dos tecidos facilitam ou dificultam o processo.

Existem ainda bastantes outros algoritmos como o VPM ou RGBM que oferecem diferentes métodos para calcular a saturação dos tecidos e a respetiva descompressão pelo que o estudo destes revelaria uma mais abrangente perspetiva sobre os processos de descompressão e de que forma estes respondem aos variados perfis de mergulho existentes.

Bibliografia

- Angelini, S. (2018). Dive computer decompression models and algorithms: philosophical and practical views.
- Baker, E. C. (1998). Understanding M-Values.
- Becker, G. D., & Parell, G. J. (2001). Barotrauma of the ears and sinuses after scuba diving.
- Bühlmann, A. A. (1983). *Tauchmedizin*. Suiça: Springer.
- Chapman, P. (1999). *Decompression Theory: An Explanation of Professor A.A. Buehlmann's ZH-L16 Algorithm*.
- Cousteau, J. Y., & Gagnan, E. (1949). *Paris, França Patent No. 2485039*.
- Davis, A. (2023). *Andy Davis Sidemount Technical Wreck Diving Blog*. Retrieved from A Simple Guide to Understanding Dive Computer Algorithms: https://scubatechphilippines.com/scuba_blog/a-simple-guide-to-dive-computer-algorithms/
- Department of National Defence of Canada. (2004). *Canadian Armed Forces Diving Manual: Self-Contained Mixed-Gas Diving* (Vol. 4). Canada.
- Department of National Defence of Canada. (2010). *Canadian Forces Diving Manual: Surface Supplied Diving Manual* (Vol. 3). Canada.
- Department of National Defence of Canada. (2016). *Canadian Armed Forces Diving Manual: Organization, Regulations, Rules and Compressed Air Breathing Apparatus (CABA) Diving* (Vol. 2). Canadá.
- Department of National Defense of Canada. (1989). *Underwater Diving in the Canadian Armed Forces: History, Physics and Physiology* (Vol. 1). Canada.
- DIPN'DIVE. (n.d.). *Dive Computer Algorithms for Dummies*. Retrieved março 6, 2024, from <https://dipndive.com/blogs/dive-gear/dive-computer-algorithms-for-dummies>
- Dive-Tech. (n.d.). *Decompression Theory: Half Times Explained*. Retrieved março 14, 2024, from <http://www.dive-tech.co.uk/half%20times.htm>
- Djozic, A. (2022). Use of Technology in Scuba Diving. *Dive Computers: Ensuring Continuous Safety and Peak Experience*.
- Eun, S. J., J.Y.Kim, & Lee, S. H. (2019). Development of Customized Diving Computer Based on Wearable Sensor for Marine Safety.
- Yuan, J., Li, Z., Ma, Q. et al. (2023) Noninvasive fluid bubble detection based on capacitive micromachined ultrasonic transducers. *Microsyst Nanoeng* 9, 20
- JJ-CCR. (2024, maio 27). *JJ-CCR*. Retrieved from <https://jj-ccr.com/the-jj-ccr-rebreather/>

Lippmann, J., & Wellard, M. (2004). Comparing Dive Computers. *South Pacific Underwater Medicine Society*, 124-129.

NATO. (2020). *ADivP-01.1 - Allied Guide to Diving Operations - National Information (A Ver.3 ed.)*.

PADI. (2015). *Open Water Diver Manual (3.01 ed.)*. Brasil: PADI.

Pim's Tekdiving. (2024, maio 24). *Tekdiving*. Retrieved from Rebreathers in a nutshell: <https://tekdiving.nl/rebreathers-in-a-nutshell>

Powell, M. (2014). *Deco for Divers (2º ed.)*. United Kingdom: Aqua Press.

Thalmann, E. D. (1984). *Phase II Testing of Decompression Algorithms*. USA: USNavy.

U.S.NAVY. (2016). *U.S. Navy Diving Manual (7 ed.)*. U.S.A.

Glossário

Doença Descompressiva (*Decompression sickness*) – Doença que se desenvolve como resultado de perturbações nos tecidos causadas pela formação de bolhas de gases inertes nos tecidos.

Gradiente de pressão (*Pressure Gradient*) – Diferença entre as pressões parciais de um gás dissolvido e o ambiente em que este está inserido.

Limite Não Descompressivo (*No-decompression limit*) – Tempo de fundo máximo que permita uma subida direta à superfície sem necessidade de realizar patamares de descompressão.

Patamar de Descompressão (*Decompression Stop*) – Tempo específico que o mergulhador deve permanecer a uma determinada profundidade para permitir a eliminação da quantidade suficiente de gás inerte do corpo e permitir uma subida segura até ao próximo patamar de descompressão ou à superfície.

Perfil de Descompressão (*Decompression Schedule*) – Procedimento específico de descompressão para uma determinada profundidade e tempo de fundo.

Tempo de Fundo (*Bottom time*) – Tempo total decorrido (em minutos) entre o momento em que o mergulhador inicia a descida e o momento em que abandona o fundo.

Apêndice - Tabelas de Resultados da Integração

Perfil (EAD/tempo)	Percentagem de m-value à superfície	Algoritmo	Patamares	Tempo DECO	Tensão Tecidualar	GF
A1 (18/20)	NIL	Bühlmann	NIL	NIL	NIL	NIL
		DCIEM	NIL	NIL	NIL	NIL
		USNAVY	NIL	NIL	NIL	NIL
B1 (39/20)	131	Bühlmann	4	19		40/85
		DCIEM	2	18		78/87
		USNAVY	1	13		62/95
C1 (51/20)	>150	Bühlmann	6	43		40/85
		DCIEM	4	39		70/92
		USNAVY	3	39		61/95
A2 (12/90)	NIL	Bühlmann	NIL	NIL	NIL	NIL
		DCIEM	NIL	NIL	NIL	NIL
		USNAVY	NIL	NIL	NIL	NIL
B2 (18/50)	89	Bühlmann	1	4		40/85
		DCIEM	0	1		10/90
		USNAVY	0	2		10/88
C2 (24/40)	110	Bühlmann	2	14		40/85
		DCIEM	1	11		70/85
		USNAVY	1	4		36/104
D2 (35/20)	146	Bühlmann	4	13		40/85
		DCIEM	2	15		67/77
		USNAVY	1	8		40/97
E2 (51/10)	111	Bühlmann	4	13		40/77
		DCIEM	2	13		66/79
		USNAVY	1	12		57/83