



Modelos de descompressão FASE LIVRE

João M. Carvalho
ENTRADA



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Sucessos de Haldane & Cia

- Primeiro modelo explicativo da descompressão
- Redução drástica dos acidentes de descompressão
- Matematicamente simples
 - Profusão de tabelas/*softwares* de descompressão
 - Profusão de computadores de descompressão

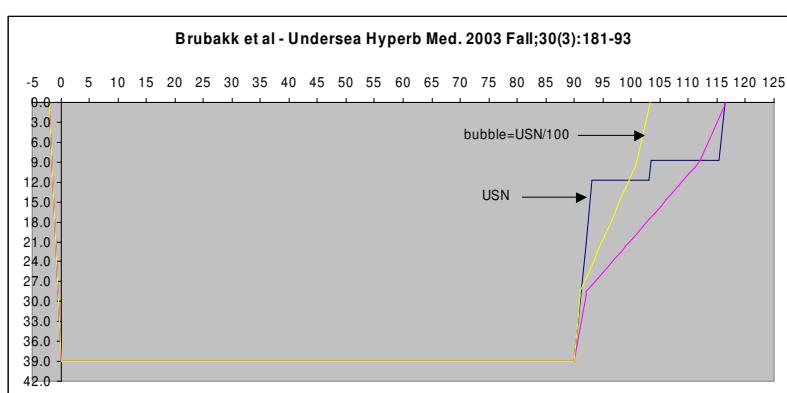


Insucessos de Haldane & Cia

- Abordagem à causa assumida de DCS - BOLHAS
- Relação *velocidade de subida - DCS*
- *Deepstops*
- Extrapola mal fora da zona testada (0-60m, N₂/O₂ ou He/O₂)
- Estratégia única de aumento da segurança – aproximação da *descompressão quasi-estática*



Haldane: simples e incompleto!





Mecanismo da DCS

- Acção mecânica das bolhas?
- Resposta imunitária às bolhas?
 - SIM: Brubakk (1989), Tikuvisis & Gerth (2003)
 - NÃO: Zhang (1991), Hjelde (1995), Shastri (1997)



Mecanismo da DCS

- Localização das bolhas – doppler:
 - Venosa
 - Intramuscular (fascia)
 - Tendinosa
 - Arterial
- Ocorrência
 - Usualmente minutos a horas após emergir



Mecanismo da DCS

● Incidência de bolhas (e DCS ?) função:

- Fadiga pré mergulho (Masurel et al)
- Outros factores pessoais?

- Perfil
- Gases respirados



Mecanismo da DCS

● Localização das bolhas

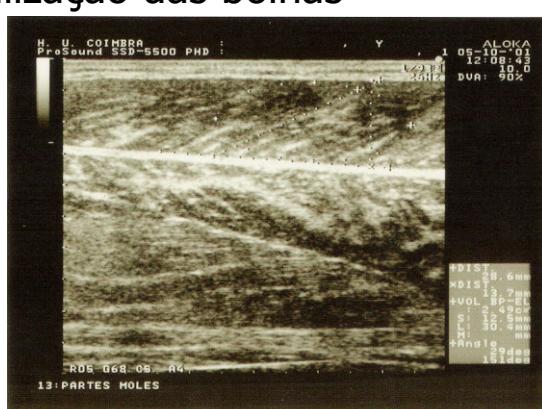
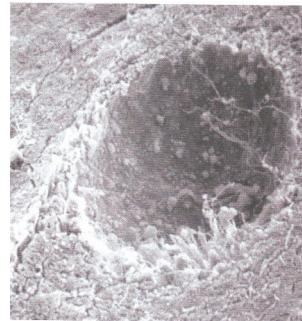
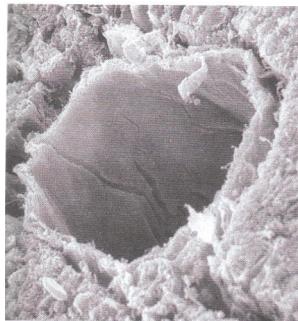


Foto: Conceição, F. – Tese Doutoramento FADEUP (2005)



Mecanismo da DCS

- Localização das bolhas



Fotos: matéria branca da espinha medular. Francis et al. in Undersea Biomed Res 1998; 16: 439-451



Mecanismo da DCS

- Localização das bolhas

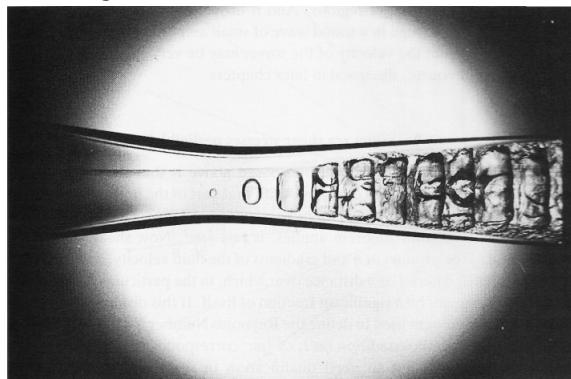


Foto: E. Klein, Hermann-Föttinger-Institut Berlin



Mecanismo da DCS

• VGE \leftrightarrow DCS

- NÃO: Bayne et al (1985), ...
- SIM: Vann (1982), Eatock (1984), Eckenhoff (1985), Jenssen (1990), ...



Mecanismo da DCS

• VGE \leftrightarrow DCS ... depende do gás

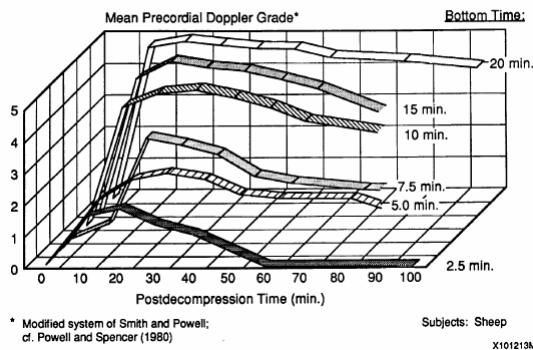
air					Bubble grade	heliox				
0	I	II	III	IV	# subjects	0	I	II	III	IV
819	287	183	365	72		715	260	227	400	171
0	3	2	23	7	subjects with DCS	1	1	0	15	17
0.0	1.1	1.1	6.3	9.7	Incidence (%)	0.1	0.4	0.0	3.8	9.9

- DCIEM data: Sawatzky & Nishi (1990), Sawatzky (1991)



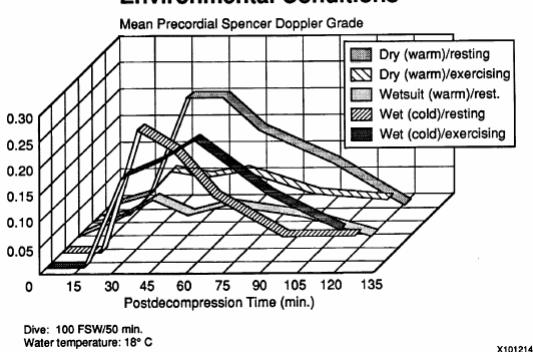
Mecanismo da DCS

Growth and Decay of Precordially Monitored Doppler Bubbles



Mecanismo da DCS

Decompression Stress Under Varying Environmental Conditions





Bolhas

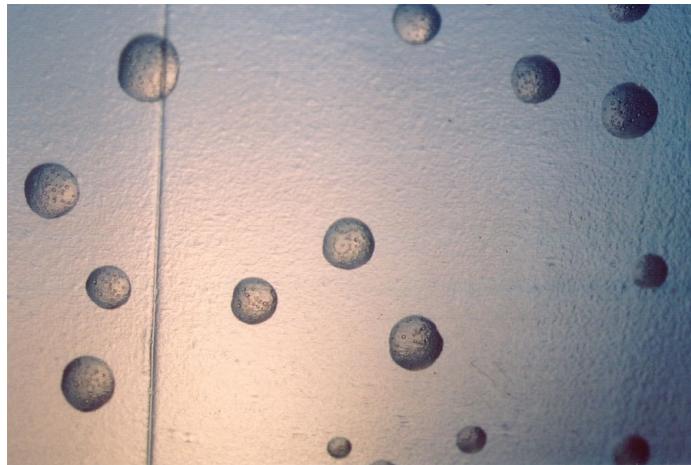


Foto: © Roy Shenhav - Univ. Jerusalem - <http://chem.ch.huji.ac.il/~royx>



Balanço de gases

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q}{V}(c_i^a - c_i^v) + \nabla(D \nabla c_i) - \frac{M_i}{V} - \frac{B_i}{V}$$

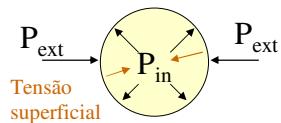
$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{Q}{V}(p_i^a - p_i^v) + \nabla(D \nabla p_i) - \frac{M_i}{V \cdot \alpha} - \frac{B_i}{V \cdot \alpha}$$

- B relaciona-se com a dinâmica das bolhas
- M relaciona-se com a janela de oxigénio



Física de bolhas

- Análise em água pura



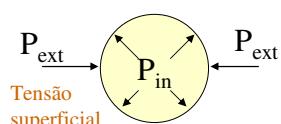
$$P_{ext} + \frac{2\gamma}{r} + \dots = P_{in}$$

- Como $P_{in} > P_{amb}$ (pressão do gás dissolvido) o gás difunde-se para fora da bolha e esta dissolve-se
- Virtualmente não há bolhas estáveis em água pura



Física de bolhas

- Análise num meio mais *biológico*



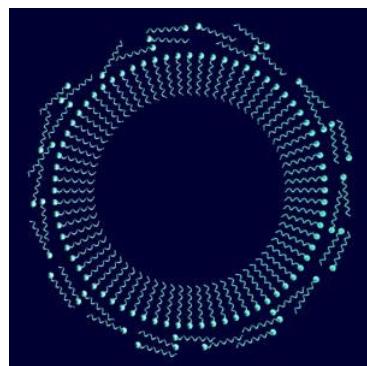
$$P_{ext} + \frac{2\gamma}{r} - D = P_{in}$$

Surfactantes,
Van der Walls,
Etc.

- As moléculas de surfactante repelem-se diminuindo a tensão superficial
- Existem bolhas estáveis em equilíbrio (até um certo raio)!



Física de bolhas

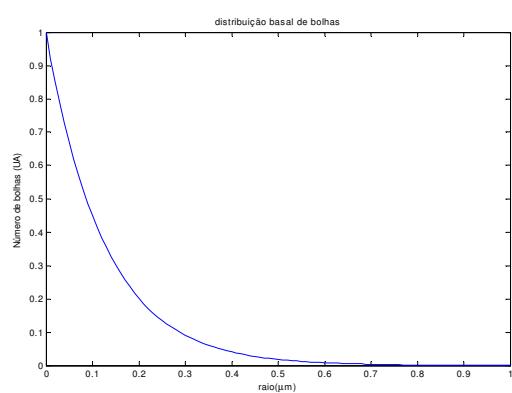


Desenho: © Jürgen van der Velde – <http://www.deepocean.net/>



Física de bolhas

- Distribuição basal $N = N_0 \cdot e^{-k \cdot r}$

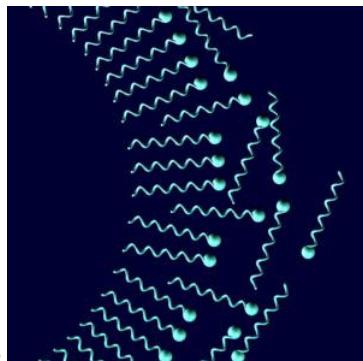




Física de bolhas

- Descida

- Compressão das bolhas
- Redução do número de moléculas surfactantes



Desenho: © Jörgen van der Velde – <http://www.deepocean.net/>



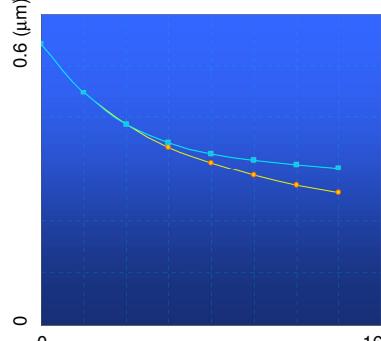
Física de bolhas

- Mergulhos profundos, com descompressão correcta devem ocorrer ANTES de mergulhos menos profundos
- O tempo de restauro da distribuição basal é da ordem da semana!



Física de bolhas

- A certas pressões (>70m) a película de surfactante torna-se impermeável



- Isso reduz a perda de gás da bolha na descida e prejudicará a descompressão

Desenho: © Marcin Kaluza – <http://www.blplanner.com/>



Física de bolhas

- Recordando

$$P_{ext} + \frac{2\gamma}{r} = P_{in} + \dots$$

- Ascendendo

$$P_{ss} + P_{ext} + \frac{2\gamma}{r} = P_{in}$$

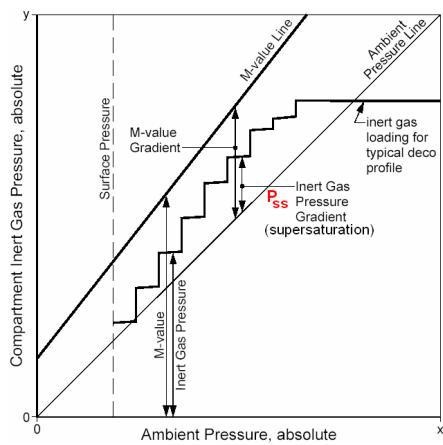
$P_{ss} > \frac{2\gamma}{r_1} \Rightarrow$ crescimento das bolhas de raio r_1 ou maiores

$P_{ss} < \frac{2\gamma}{r_2} \Rightarrow$ diluição das bolhas de raio r_2 ou menores



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Haldane – M-values



Picture from: Erik C. Baker: "Understanding M-values"



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Física de bolhas

Ascensão

- Postulado limite para tamanho mínimo das bolhas que poderão crescer (limita o seu número)

$$r_c = \frac{2\gamma}{P_{ss}}$$

- O mesmo que limitar a sobrepressão máxima

$$P_{ss} = \frac{2\gamma}{r_c}$$



Física de bolhas

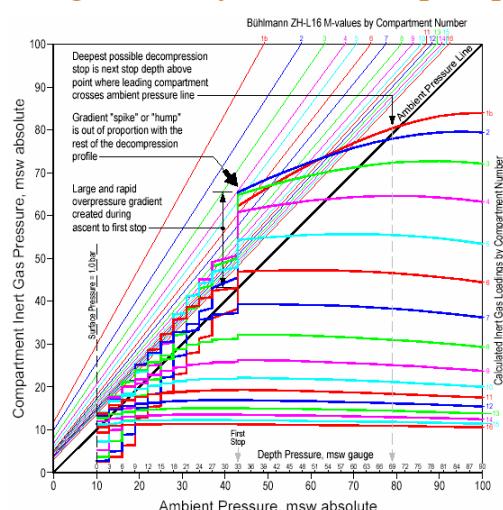
Ascensão

- As sobrepressões toleráveis são menores para os compartimentos rápidos do que para os lentos (o oposto de Bühlmann)
- As paragens iniciam-se mais profundamente
- As paragens pouco profundas são mais curtas

- Adicionalmente, em ascenção as bolhas expandem-se por efeito de Boyle (VPM-B)



Sobrepressão, gradient factors, deepstops

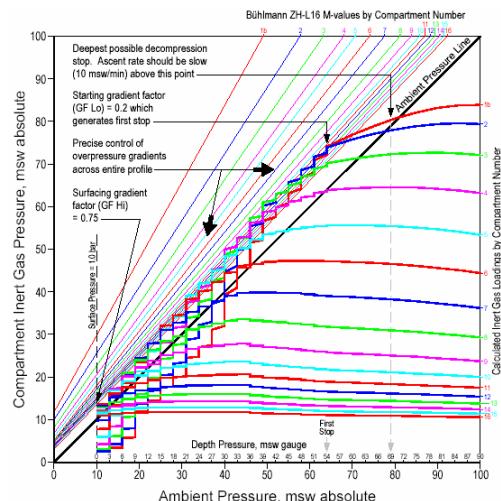


Picture from: Erik C. Baker: Clearing Up The Confusion About "Deep Stops"



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Sobrepressão, gradient factors, deepstops



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Física de bolhas

Ascensão – ideia adicional

- Pode-se violar as restrições ao tamanho mínimo das bolhas (r_c) desde que ...
- o volume total de gás livre seja limitado – hipótese do volume crítico
- A fase iterativa dos algoritmos, calculando volume total para perfis crescentemente mais curtos



Modelos de bolhas

- A teoria de ascensão descrita é maioritariamente de Hills
- A permeabilidade variável, na descida, é devida a Yount



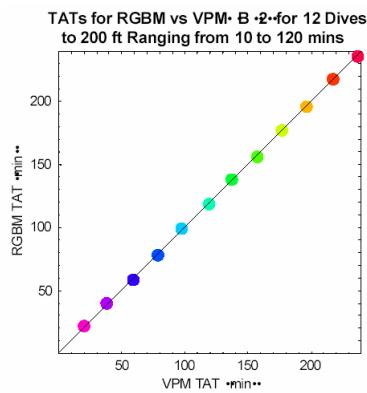
Modelos de bolhas

- RGBM (Wienke)
 - Modelo mais sofisticado da película de surfactante
 - Modelo mais sofisticado da regeneração da distribuição basal
 - Inclui difusão e perfusão dos compartimentos



Modelos de bolhas

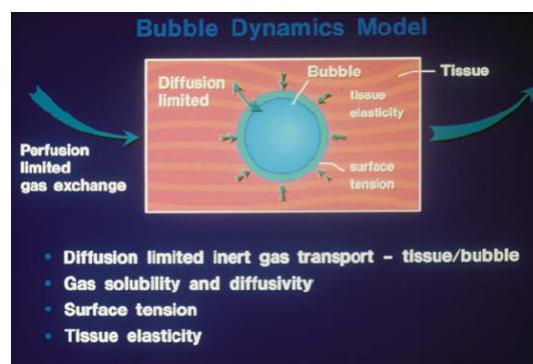
● RGBM (Wienke)



Modelos de bolhas

● TBDM (Gernhardt)

- Inclui difusão e perfusão
- Inclui deformação tecidual
- Trata descompressão hipobárica
- É completamente público



Picture from: Michael Gernhardt – Proceedings of the Advanced Diving Workshop (2006)



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Modelos de bolhas - Balanço

- Conceptualmente mais completos
- Perfis mais próximos da experiência
- Muito mais constantes ad-hoc
- Muito difíceis de calibrar

The screenshot displays four separate windows of the Decoplanner 3.1.3 software interface, each representing a different dive mission. The windows are arranged in a 2x2 grid.

- Mission: 1 Dive: 1**: Dive time 40 mins, deco time 19 mins, max stop depth 30m. Depth plan: 45, 20, 21, 35, 1.16, 21. Gas plan: 24, 232, 21, 35, 56.67, 0, 2464, 103.
- Mission: 2 Dive: 1**: Dive time 30 mins, deco time 12 mins, max stop depth 30m. Depth plan: 30, 30, 30, 1.20, 12. Gas plan: 24, 232, 30, 30, 36.67, 0, 2841, 118.
- Mission: 1 Dive: 2**: Dive time 41 mins, deco time 10 mins, max stop depth 15m. Depth plan: 30, 30, 30, 30, 1.20, 12. Gas plan: 24, 232, 30, 30, 36.67, 0, 2754, 115.
- Mission: 2 Dive: 2**: Dive time 43 mins, deco time 10 mins, max stop depth 15m. Depth plan: 45, 20, 21, 35, 1.16, 21. Gas plan: 24, 232, 21, 35, 56.67, 0, 2464, 105.

The software interface includes tabs for 'Bühlmann' and 'VPM' decompression models, and buttons for 'Plan Dive', 'No Deco Gas', 'Bungee Plan', 'Graphs', 'Analysis', and 'Next Dive'.

Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Decoplanner 3.1.3

Mission: 1 Dive: 1

Depth [Metres]	Time [D2]	He	PP02	Cell	Clear	Deco	Set	Clear	Gas Plan	Fill	D2	He	MOD	Res	Lived	BAR	OTU
45	20	21	0	1.16	21	<= 21	50	0	24	232	21	0	56.67	0	2464	103	72
									7	232	50	0	18.00	0	502	72	

Bühlmann VPM

Dive Plan ZHL16B Safety Off Descent Normal

Depth	Time	D2	He	PP02	End	Gas	Gas Readl	GFS	MinAlt	CNS%	OTU	
20	37	0	0	1.16	18	2464	0	13	8	22.91		
21	1	50	0	22	23	20.00	74	20	62	10	25.95	
22	1	50	0	23	24	1.26	238	0	55	9	23.95	
23	1	50	0	24	25	20.00	44	57	74	11	29.07	
24	1	50	0	25	27	20.00	76	66	80	11	30.97	
25	2	50	0	26	28	20.00	98	94	92	12	31.31	
26	2	50	0	27	29	0.91	120	98	92	12	31.91	
27	3	50	0	31	36	0.66	20.00	130	85	88	13	35.39
28	3	50	0	31	37	0.66	20.00	130	85	93	13	35.44

Nitrox

Dive Time: 37 mins Deco Time: 15 Max Stop Depth: 27 GF Lo%: 20 GF Hi%: 85

Mission: 2 Dive: 1

Depth [Metres]	Time [D2]	He	PP02	Cell	Clear	Deco	Set	Clear	Gas Plan	Fill	D2	He	MOD	Res	Lived	BAR	OTU
45	20	21	0	1.16	21	<= 21	50	0	24	232	21	0	56.67	0	2464	103	72
									7	232	50	0	18.00	0	674	96	

Bühlmann VPM

Dive Plan ZHL16B Safety Off Descent Normal

Depth	Time	D2	He	PP02	End	Gas	Gas Readl	GFS	MinAlt	CNS%	OTU
20	37	0	0	1.16	18	2464	0	13	8	22.91	
21	1	50	0	22	23	1.56	20.00	95	10	25.95	
22	1	50	0	23	24	1.41	20.00	95	10	25.95	
23	1	50	0	24	25	1.26	20.00	50	11	23.01	
24	1	50	0	25	27	1.11	20.00	88	12	31.35	
25	2	50	0	26	29	0.93	20.00	114	13	34.35	
26	2	50	0	30	34	0.81	20.00	128	13	36.72	
27	3	50	0	34	41	0.66	20.00	182	15	39.94	
28	3	50	0	34	42	0	20.00	182	15	39.94	

Dive Time: 41 mins Deco Time: 20 mins Max Stop Depth: 30

Mission: 3 Dives: 1

Depth [Metres]	Time [D2]	He	PP02	Cell	Clear	Deco	Set	Clear	Gas Plan	Fill	D2	He	MOD	Res	Lived	BAR	OTU
45	20	21	79	1.16	27	<= 21	50	0	24	232	21	0	56.67	0	2503	104	117
									7	232	50	0	18.00	0	822	117	

Bühlmann VPM

Dive Plan ZHL16B Safety Off Descent Normal

Depth	Time	D2	He	PP02	End	Gas	Gas Readl	GFS	MinAlt	CNS%	OTU	
20	37	0	0	1.16	18	2464	0	13	8	22.91		
21	1	50	0	21	22	0.78	20.00	37	20	85	9	24.68
22	1	50	0	22	23	0.78	20.00	37	20	85	9	24.68
23	1	50	0	22	24	1.12	20.00	52	42	92	10	25.18
24	1	50	0	23	24	1.12	20.00	52	42	92	10	25.18
25	2	50	0	24	25	1.11	20.00	56				

Helium

Dive Time: 48 mins Deco Time: 27 Max Stop Depth: 30 GF Lo%: 20 GF Hi%: 85

Mission: 4 Dives: 1

Depth [Metres]	Time [D2]	He	PP02	Cell	Clear	Deco	Set	Clear	Gas Plan	Fill	D2	He	MOD	Res	Lived	BAR	OTU
45	20	21	79	1.16	27	<= 21	50	0	24	232	21	0	56.67	0	2464	103	90
									7	232	50	0	18.00	0	630	90	

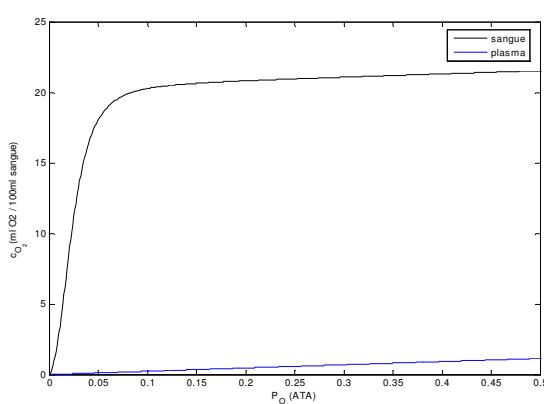
Bühlmann VPM

Dive Plan ZHL16B Safety Off Descent Normal

Depth	Time	D2	He	PP02	End	Gas	Gas Readl	GFS	MinAlt	CNS%	OTU
20	37	0	0	1.16	18	2464	0	13	8	22.91	
21	1	50	0	22	23	1.56	20.00	95	10	25.95	
22	1	50	0	23	24	1.41	20.00	95	10	25.95	
23	1	50	0	24	25	1.26	20.00	50	11	23.01	
24	1	50	0	25	27	1.11	20.00	44	11	30.20	
25	2	50	0	26	29	0.93	20.00	112	12	33.20	
26	2	50	0	29	33	0.82	20.00	128	13	35.57	
27	3	50	0	33	40	0.66	20.00	182	14	38.15	
28	3	50	0	33	41	0	20.00	182	14	38.15	

Dive Time: 40 mins Deco Time: 19 mins Max Stop Depth: 33

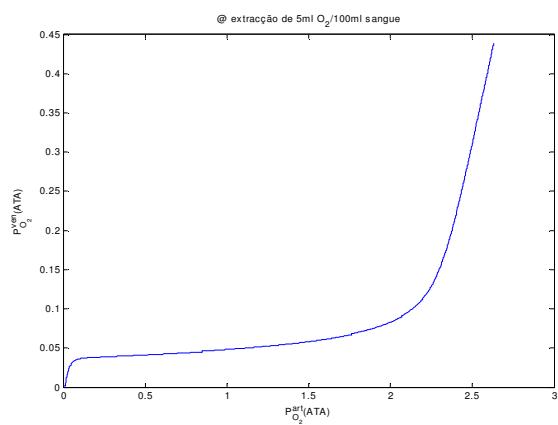
Janela de oxigénio - Hills





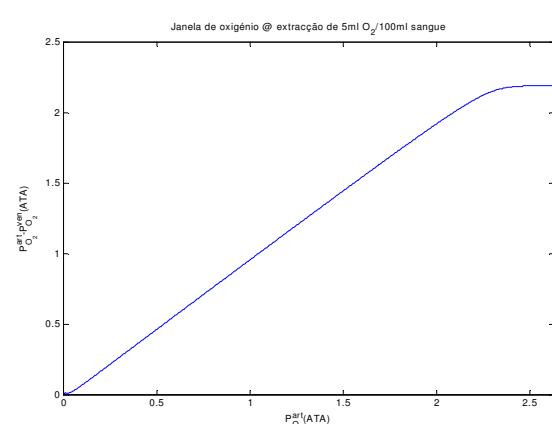
Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Janela de oxigénio



Modelos de descompressão – FASE LIVRE

Janela de oxigénio





Janela de oxigénio

- Lei de Henry $n_p = \alpha \cdot P_p$
- Descompressão clássica – sobressaturação
- Janela de oxigénio – subsaturação



Janela de oxigénio

- Afinidade da hemoglobina (janela de oxigénio) prejudicada por:
 - Aumento de temperatura
 - Acidose (lactato, bicarbonato, ...)
 - Reacção com CO₂ (carbamino-hemoglobina)

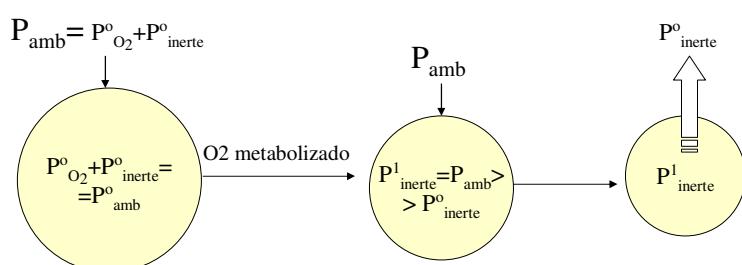


Janela de oxigénio

- Então, prolongar estadia nos patamares com P_{O_2} elevadas – troca de gases
- Mas P_{O_2} elevada implica gerir:
 - Vasoconstrição
 - Toxicidade do oxigénio (CNS)



Janela de oxigénio – termo liberal



Efeito cresce com crescimento de P_{O_2}