

CACIFI



Clube do Artigo Científico de
Fisioterapia Intensiva

Prof. Daniel Lago

Encontro 02
23.02.2022

Respiratory Mechanics

Ralph Gertler, MD, PhD

Anesthesiology Clin 39 (2021) 415–440

Pontos chave

- A medição da mecânica respiratória ainda é a base da monitorização à beira do leito da ventilação mecânica
- Idealmente, a energia aplicada ao pulmão é otimizada com base na equação da potência mecânica (*mechanical power*)
- A configuração do ventilador considera vários aspectos da transferência de energia e proteção contra lesões associadas ao ventilador
- As tecnologias mais recentes parecem promissoras; particularmente, a tomografia por impedância elétrica e a ultrassonografia pulmonar em combinação com o monitoramento convencional são atualmente a direção para o futuro

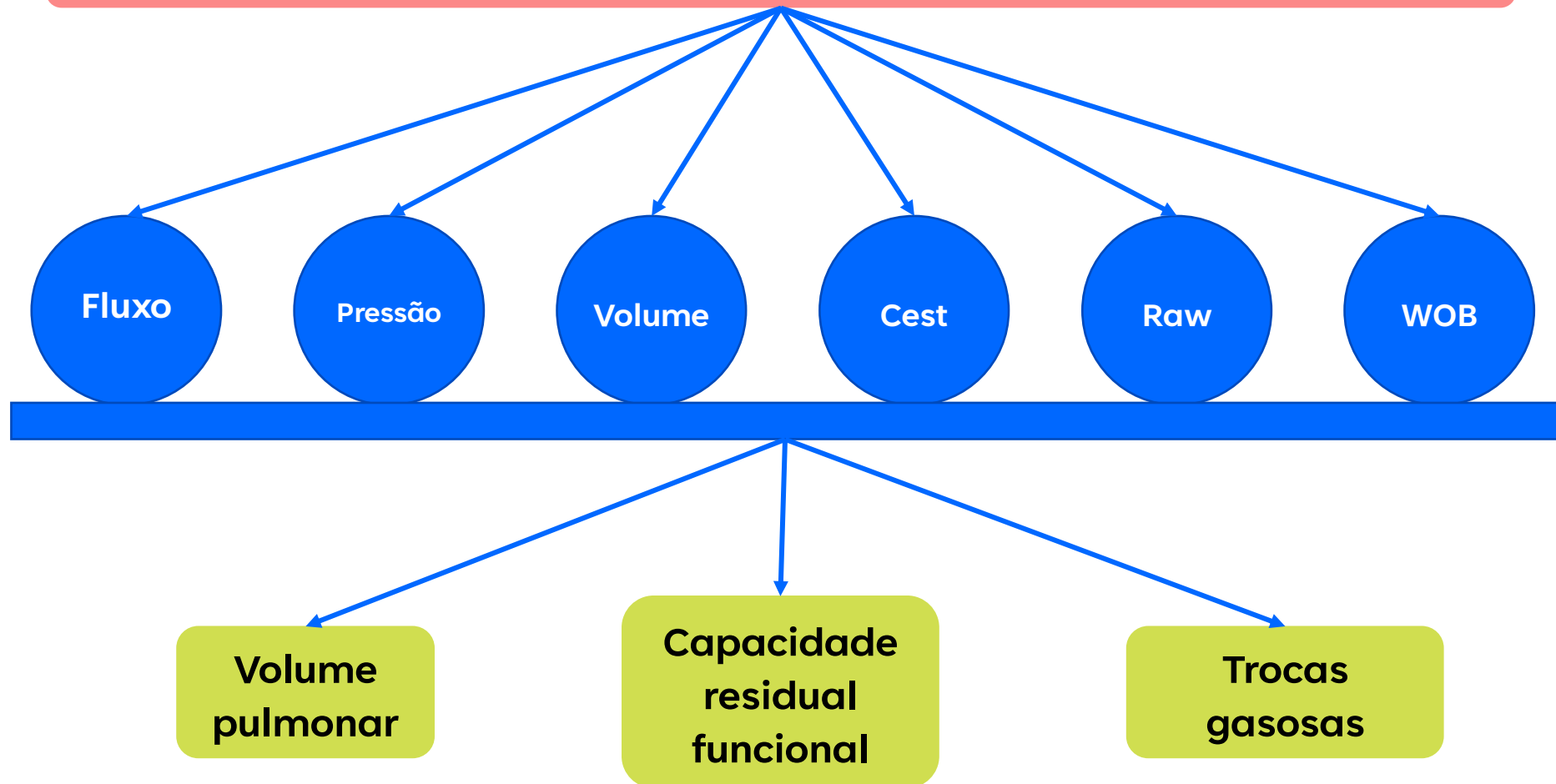
A ventilação mecânica pode lesar o tecido pulmonar por meio de barotrauma, volutrauma, atelectrauma, oxitrauma e biotrauma. Esses 5 mecanismos têm suas próprias características fisiopatológicas específicas, mas compartilham semelhanças em suas vias de lesão pulmonar (lesão pulmonar induzida pelo ventilador [VILI])

Introdução

- **Biotrauma:** mecanismos que resultam em inflamação (produção local e liberação de mediadores inflamatórios)
- **Ventilação pulmonar protetora:** minimizar a ocorrência das características fisiopatológicas da VILI
- **Prevenção da VILI:** quantidade de energia transferida do ventilador mecânico para o paciente deve ser limitada ao mínimo → VC e pressões baixas
- Breve visão geral sobre a mensuração da mecânica respiratória (também chamada de pulmonar) e os desenvolvimentos atuais no campo para atingir esse objetivo

O que é mecânica respiratória?

Expressão da função pulmonar por meio de medidas de pressão e fluxo

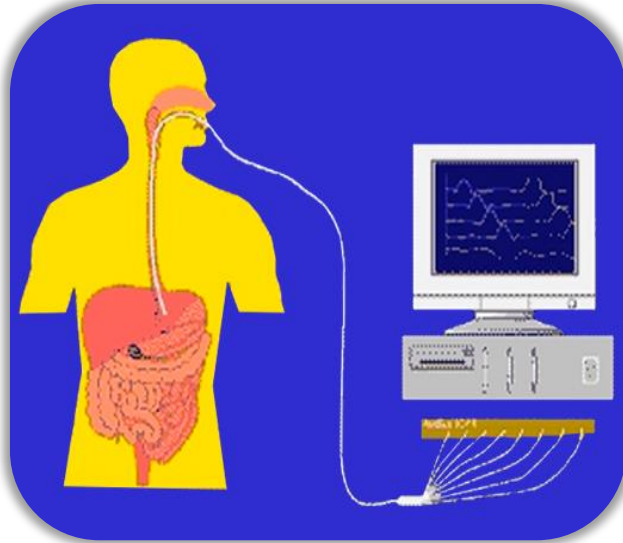


O que é mecânica respiratória?

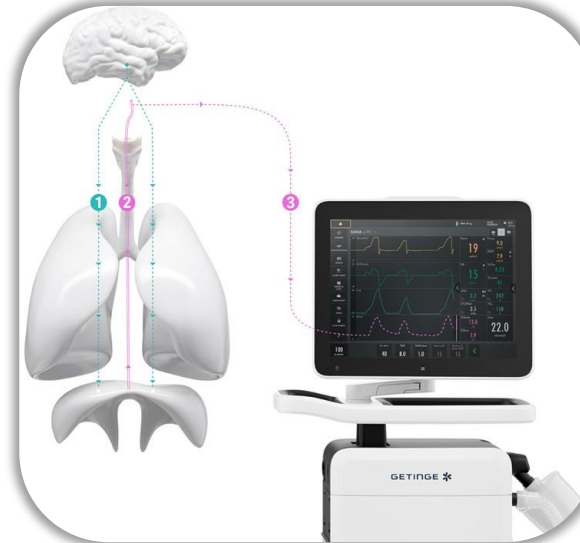
Gráficos: escalares e loops



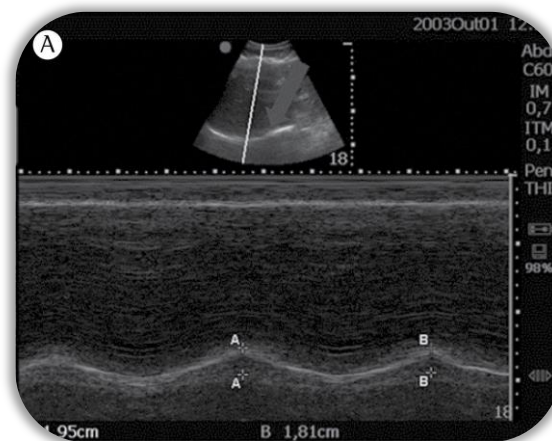
O que é mecânica respiratória?



Pressão esofágica



**Atividade elétrica
diafragmática**



**Ultrassonografia pulmonar
e diafragmática**

Para que mensurar a mecânica respiratória?



Medida temporária para substituir ou aumentar a função dos músculos inspiratórios, garantindo fluxo de gás para os alvéolos durante a inspiração

Adequar a tecnologia disponível às necessidades do paciente

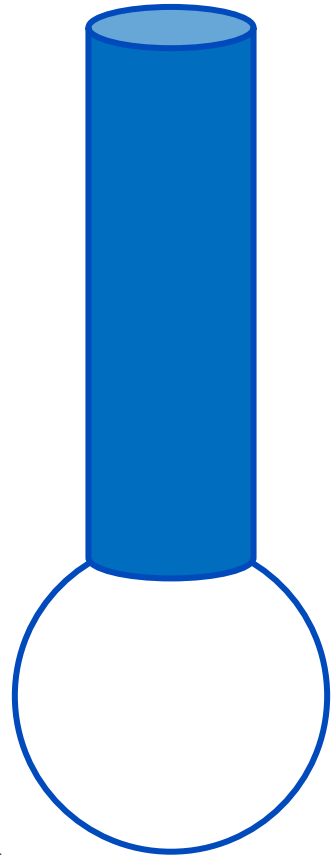
- otimizar a fisiologia pulmonar do paciente
- proporcionar troca gasosa efetiva
- manter o recrutamento alveolar
- reduzir o potencial de lesão
- garantir estabilidade hemodinâmica

Interação paciente-ventilador mostrada pelo monitor

Equação do movimento dos gases

Potência mecânica

Fisiologia da mecânica respiratória



- Resistência ao atrito ao fluxo de gás através das vias aéreas
- Resistência ao atrito da deformação dos tecidos torácicos (resistência do tecido viscoelástico)
- Inércia associada ao movimento de gás e tecido (insignificante em frequências respiratórias normais)

Componente resistivo

$$R = \Delta \text{pressão} / \text{fluxo}$$

- Resistência elástica do tecido pulmonar e da parede torácica
- Resistência das forças de superfície na interface alveolar gás-líquido

Componente elástico

$$C = \Delta \text{volume} / \Delta \text{pressão}$$

$$E = \Delta \text{pressão} / \Delta \text{volume} = 1/C$$

Conceito de potência mecânica

PEEP

VC

Pplat

ΔP

FR

Fluxo

Qualquer alteração de um componente altera outro e torna ainda mais difícil entender o relação das variáveis, borrando o quadro geral

$$P_{APPL} = P_{VENT} + P_{MUS} = V_T / C + \dot{V} \times R$$



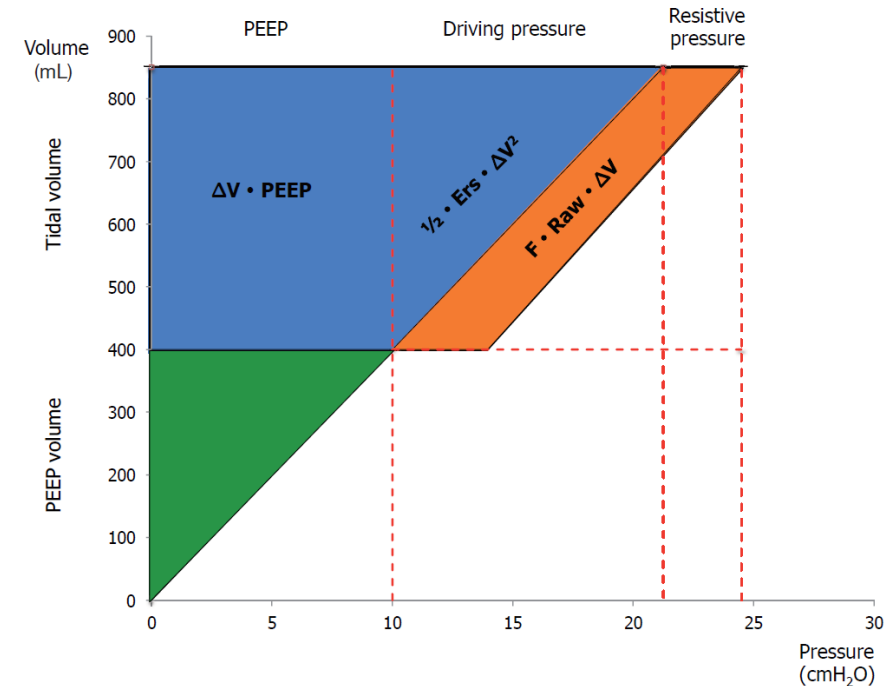
$$P_{AW(t)} = P_0 + E(V)_{(t)} + R(\dot{V})_{(t)}$$

Conceito de potência mecânica

$$Power_{rs} = RR \cdot \left\{ \Delta V^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot EL_{rs} + RR \cdot \frac{(1 + I : E)}{60 \cdot I : E} \cdot R_{aw} \right] + \Delta V \cdot PEEP \right\}$$

Conceito de potência mecânica

- Estudo em animais
- PEEP entre 0 e 7 cmH₂O
 - ✓ MP não altera
 - ✓ DP e Raw reduzem
- PEEP 11-18 cmH₂O
 - ✓ VC, DP e fluxo aumentaram a MP em 2 x
 - ✓ FR aumentou em 1,4 x
 - ✓ PEEP aumentou linearmente



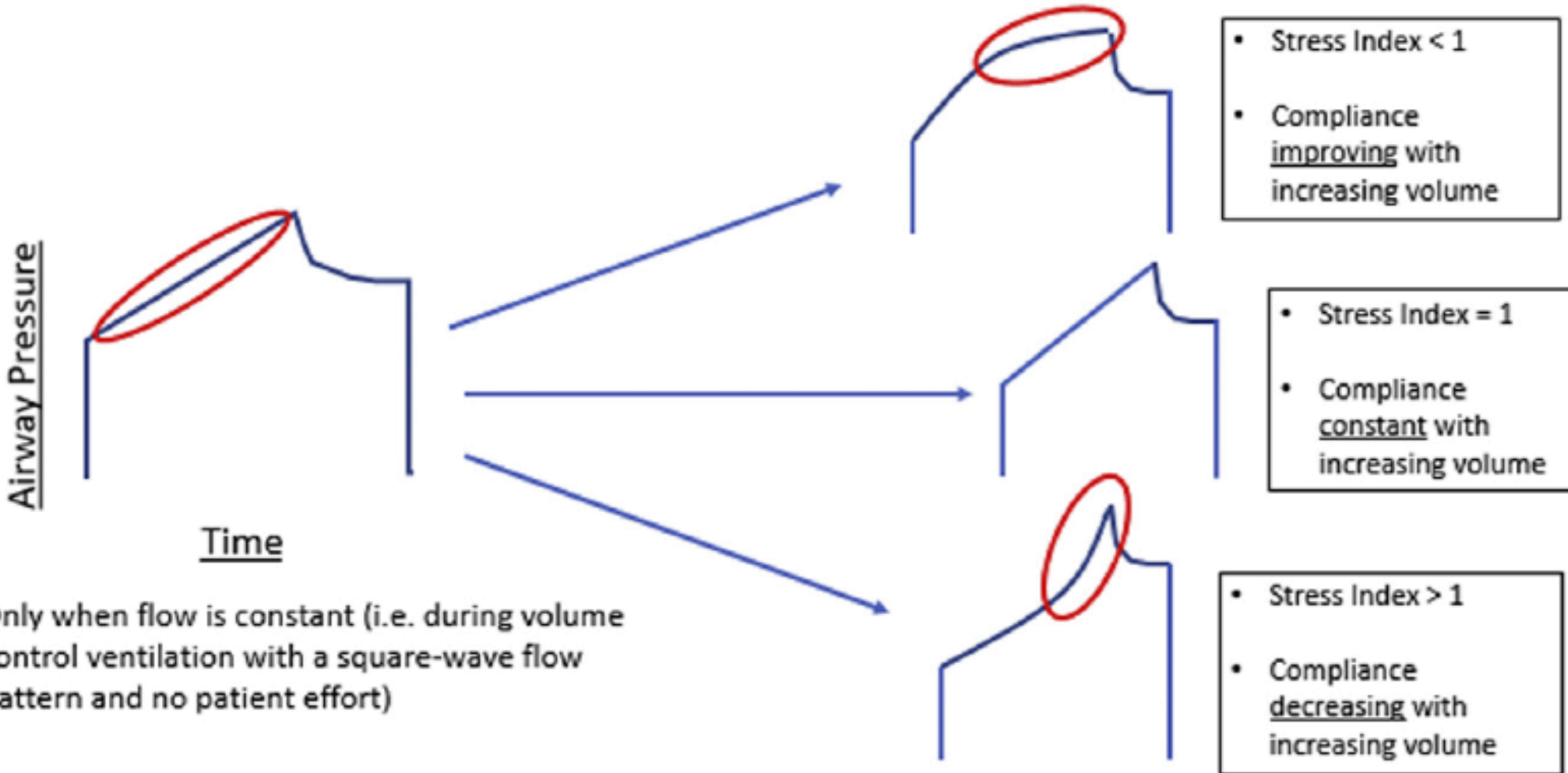
A mesma MP pode produzir efeitos diferentes em pulmões saudáveis ou lesionados

Stress

- Força aplicada a uma área → pressão aplicada ao parênquima pulmonar
- Em termos clínicos, refere-se à pressão de distensão dentro do pulmão, e a contraforça (carga externa) é a parede torácica
- Melhor indicador → pressão transpulmonar
- À beira leito → pressão de platô

Stress

Stress Index



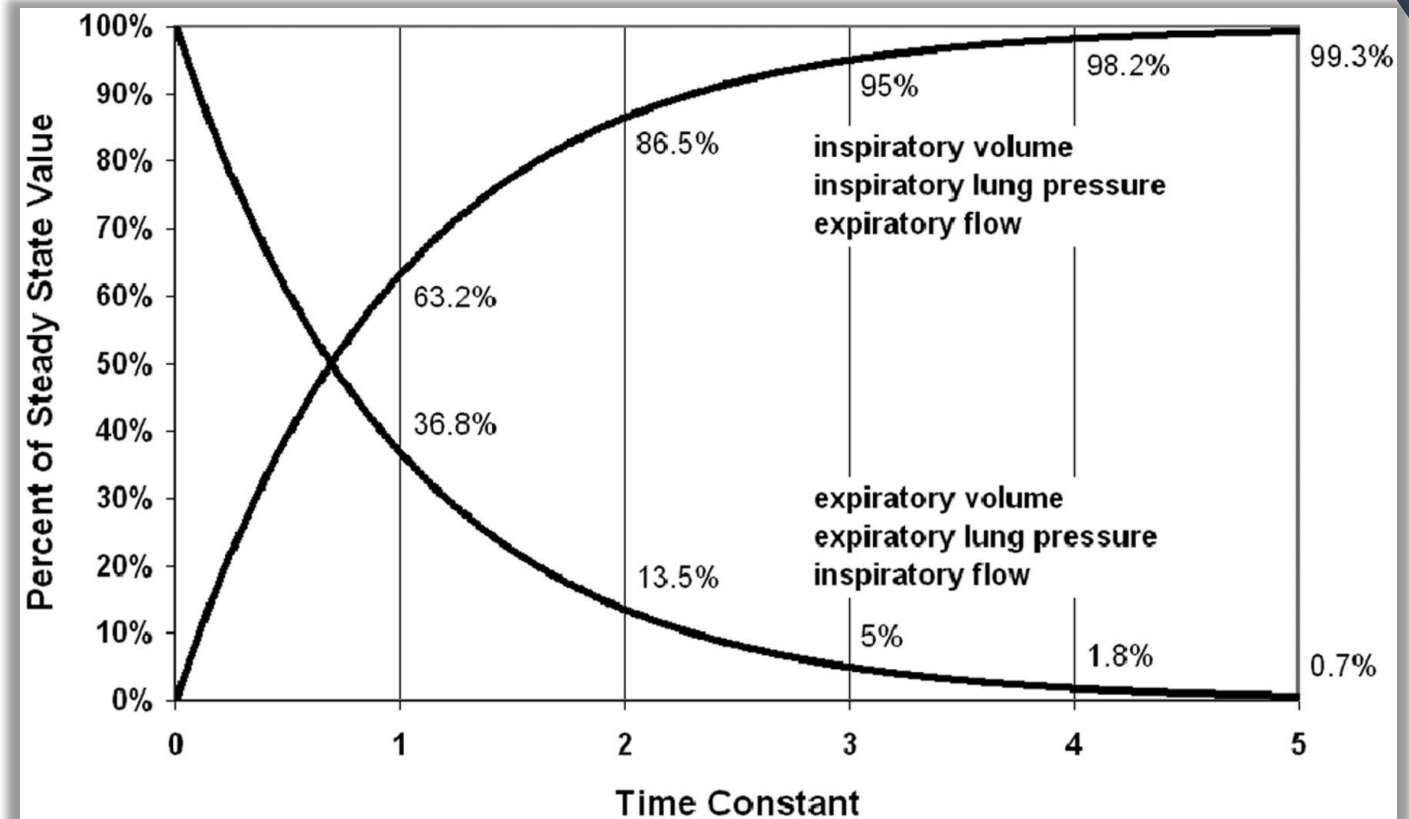
Strain

- Deformação, ou mudança, na forma de uma estrutura em comparação com sua condição de repouso
- Strain pulmonar está diretamente relacionada ao stress pulmonar:
 - $\text{stress} = k \times \text{strain}$; onde k é a elastância pulmonar específica (13,5 cmH₂O)

$$\text{strain} = \Delta V / \text{FRC}$$

Constante de tempo

- Determina a taxa de variação do volume de uma unidade pulmonar que é inflada ou desinflada passivamente
- $CT = C \times R$
- Unidades pulmonares com maior resistência e/ou complacência têm CT mais longa e requerem mais tempo para encher e esvaziar



Constante de tempo expiratória

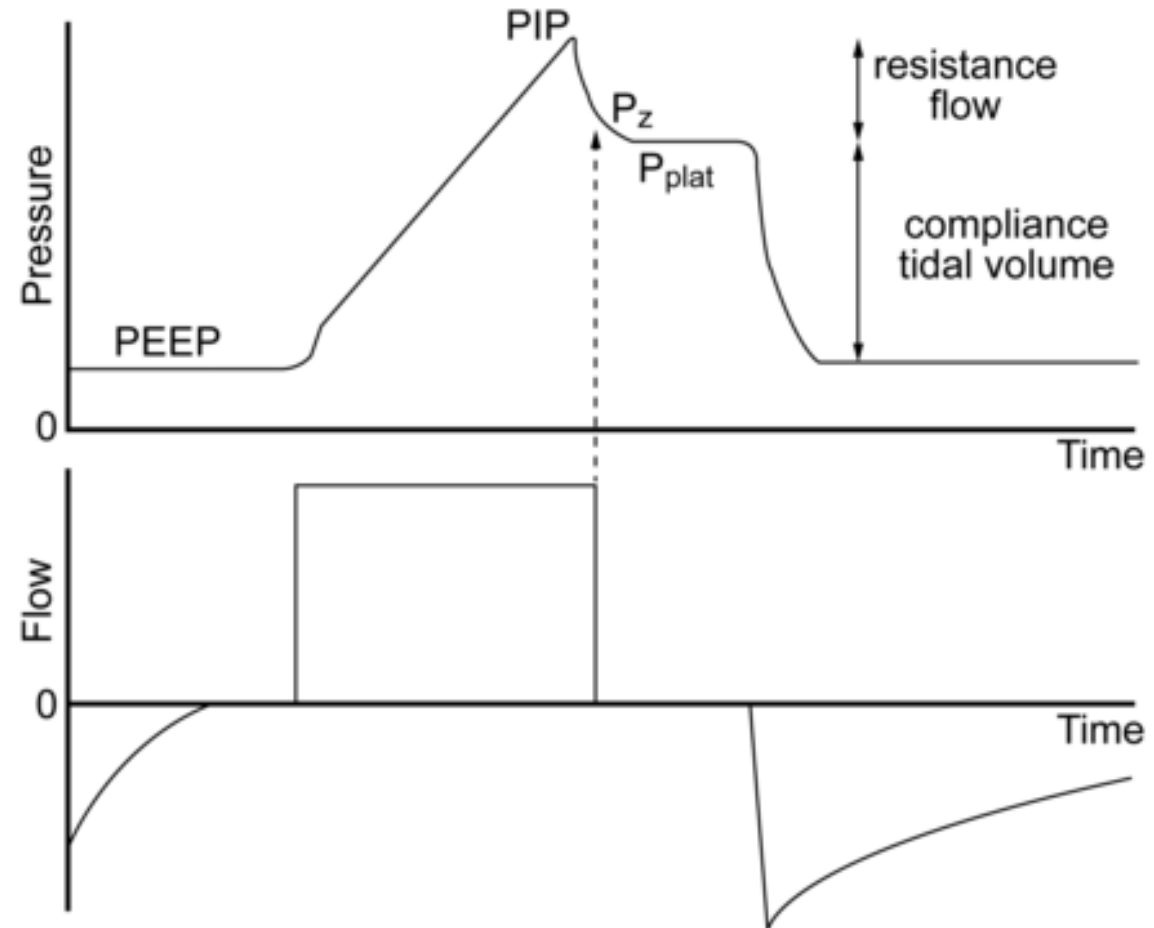
Table 1

Overview of the static lung compliance (C_{stat}), inspiratory resistance (R_{ins}) and expiratory time constant (R_{exp}) for different lung pathologies

	Normal Lung	ARDS	COPD
C_{stat} (ml/cmH ₂ O)	50–70	<40	> 50
R_{ins} (cm HsO s/L)	<10	10–15	15–40
RC_{EXP} (s)	0.5–0.7	< 0.5	> 0.7

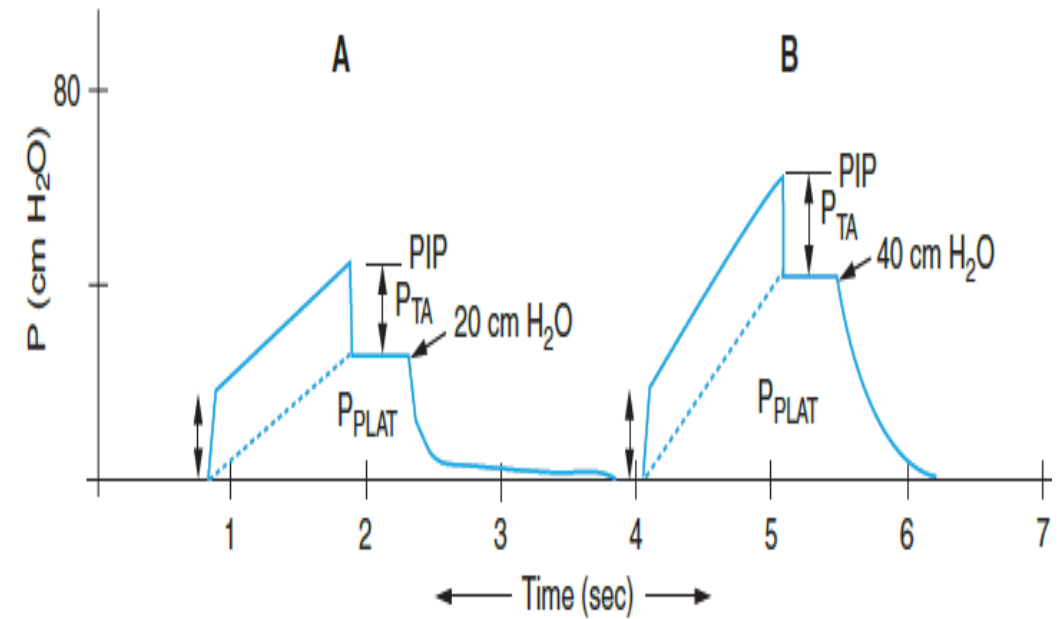
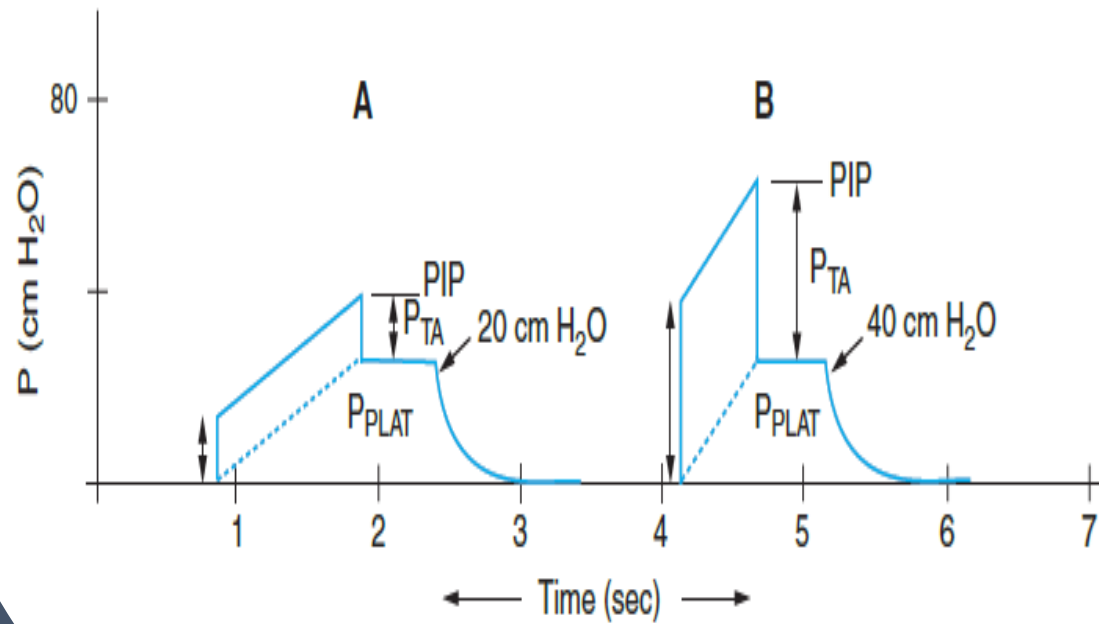
Medidas de pressão

- Pressão de pico e pressão de platô



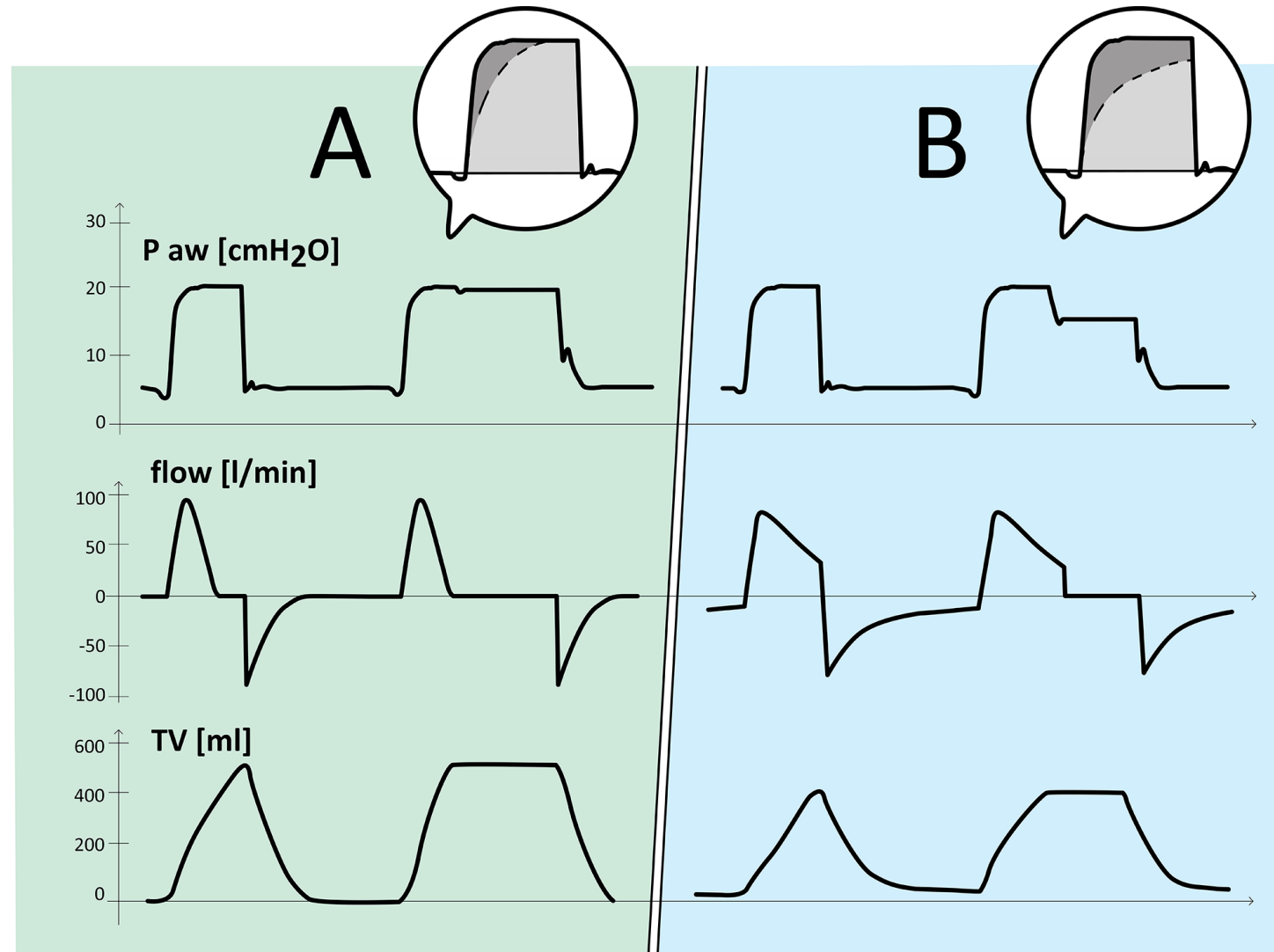
Medidas de pressão

- Pressão de pico e pressão de platô



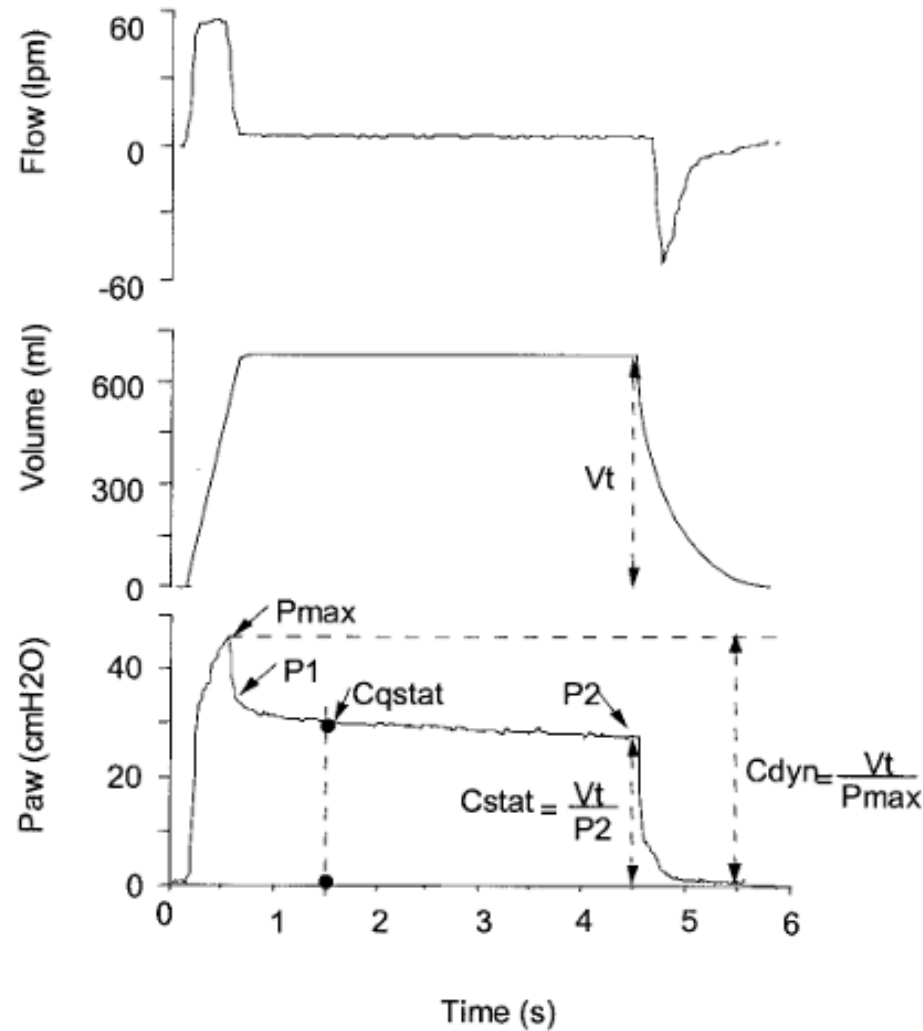
Medidas de pressão

- Pressão de pico e pressão de platô



Medidas de pressão

- Pressão de pico e pressão de platô



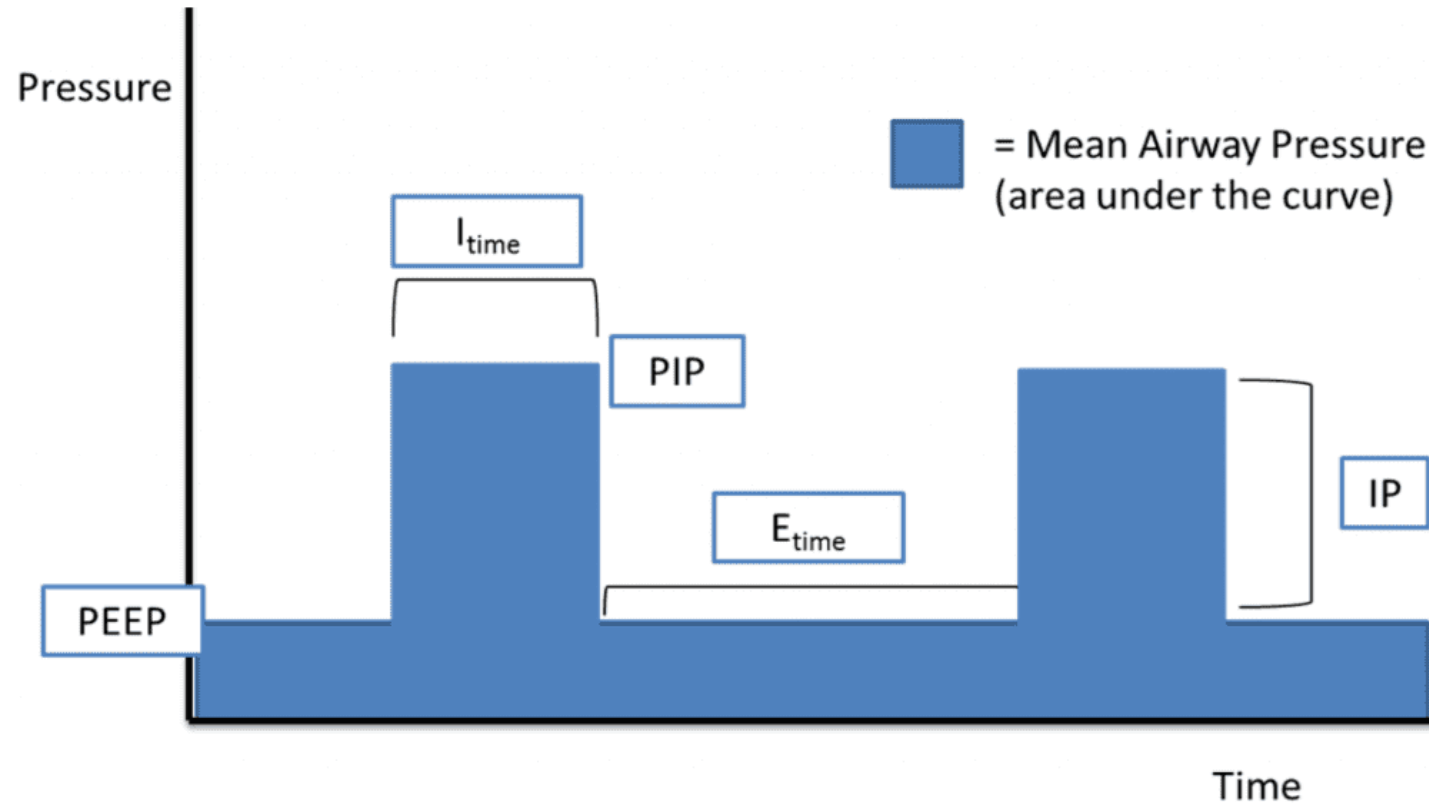
**Stress relaxation
Pendelluft**

Pausa 0,5 a 2 seg em pulmões normais

Pausa 3 a 5 seg em pulmões heterogêneos

Medidas de pressão

- Pressão média das vias aéreas



PCV

$$\text{Mean } P_{AW} = (PIP - PEEP) \times (T_i/T_{tot}) + PEEP$$

VCV

$$\text{Mean } P_{AW} = 0.5 (PIP - PEEP) \times (T_i/T_{tot}) + PEEP$$

Medidas de pressão

- Pressão média das vias aéreas

- ✓ PaO_2 é diretamente proporcional
- ✓ DC é inversamente proporcional

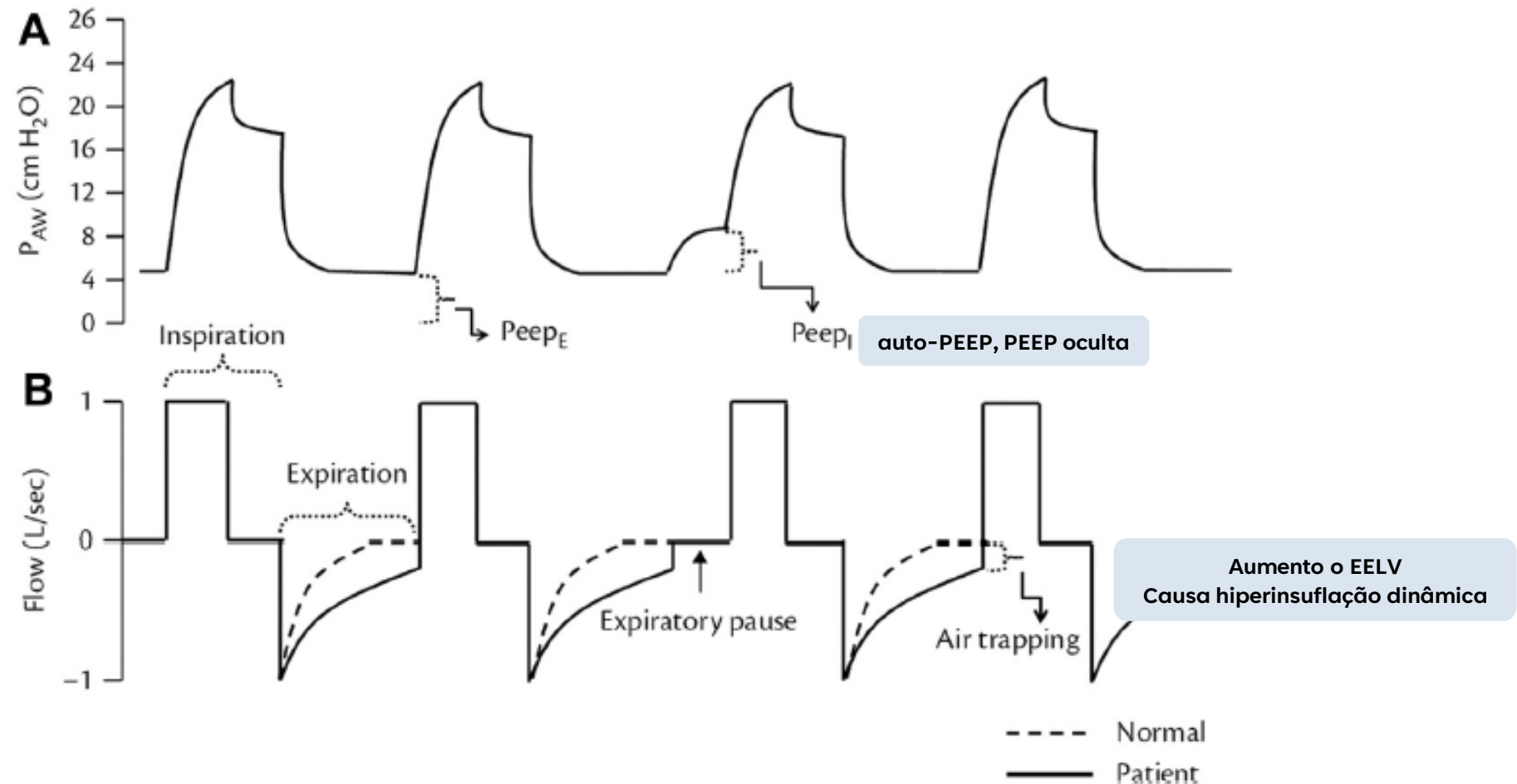
Condição (pacientes passivos)	Valor
Pulmões normais	5 a 10 cmH ₂ O
Obstrução ao fluxo aéreo	10 a 20 cmH ₂ O
SDRA	15 a 30 cmH ₂ O

Qualquer coisa que aumente a pressão das vias aéreas ou a relação I:E aumentando o tempo inspiratório ou diminuindo o tempo expiratório aumenta a pressão média das vias aéreas

Medidas de pressão

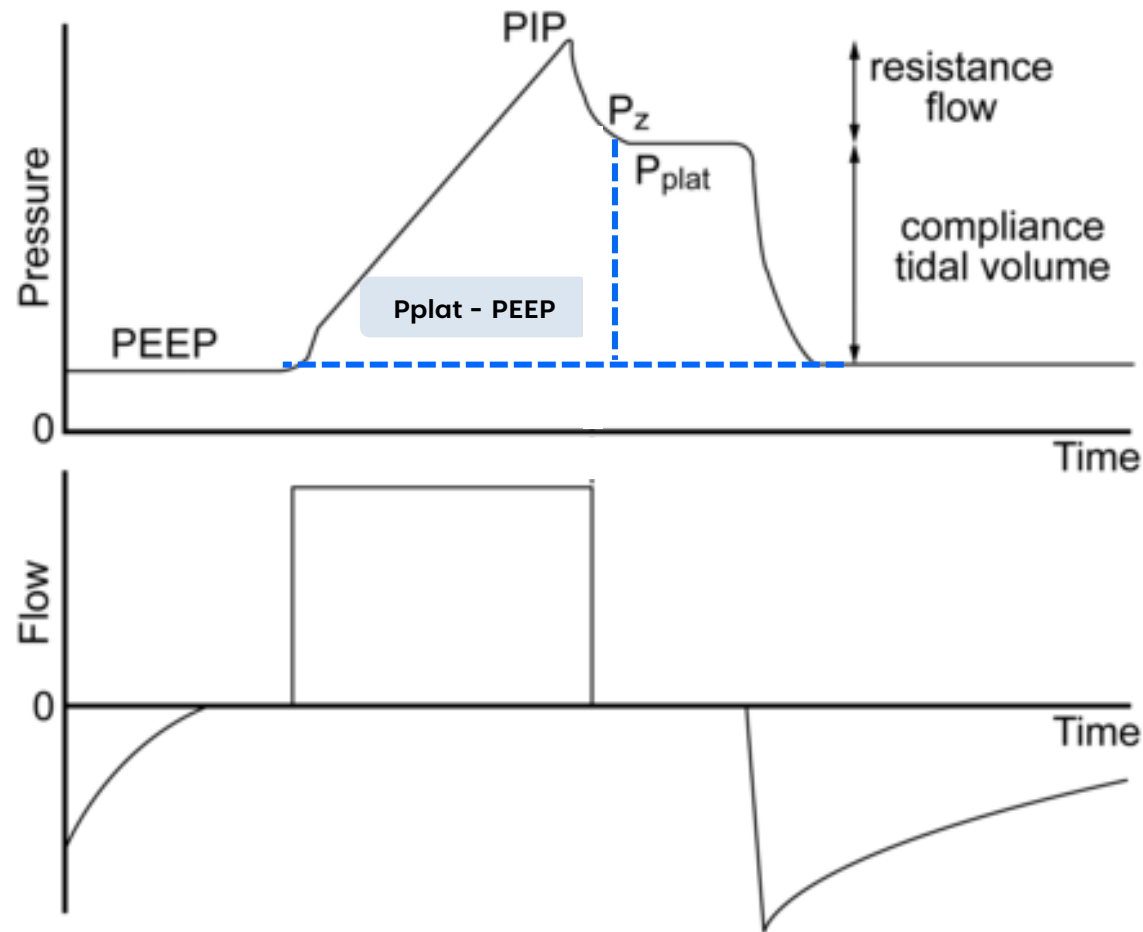
- PEEP e autoPEEP

- Redução da ventilação minuto (FR ou VC)
- Aumento do Texp (diminuição da FR ou Tins)
- Redução da Raw (p. ex., broncodilatador)



Medidas de pressão

- Driving pressure

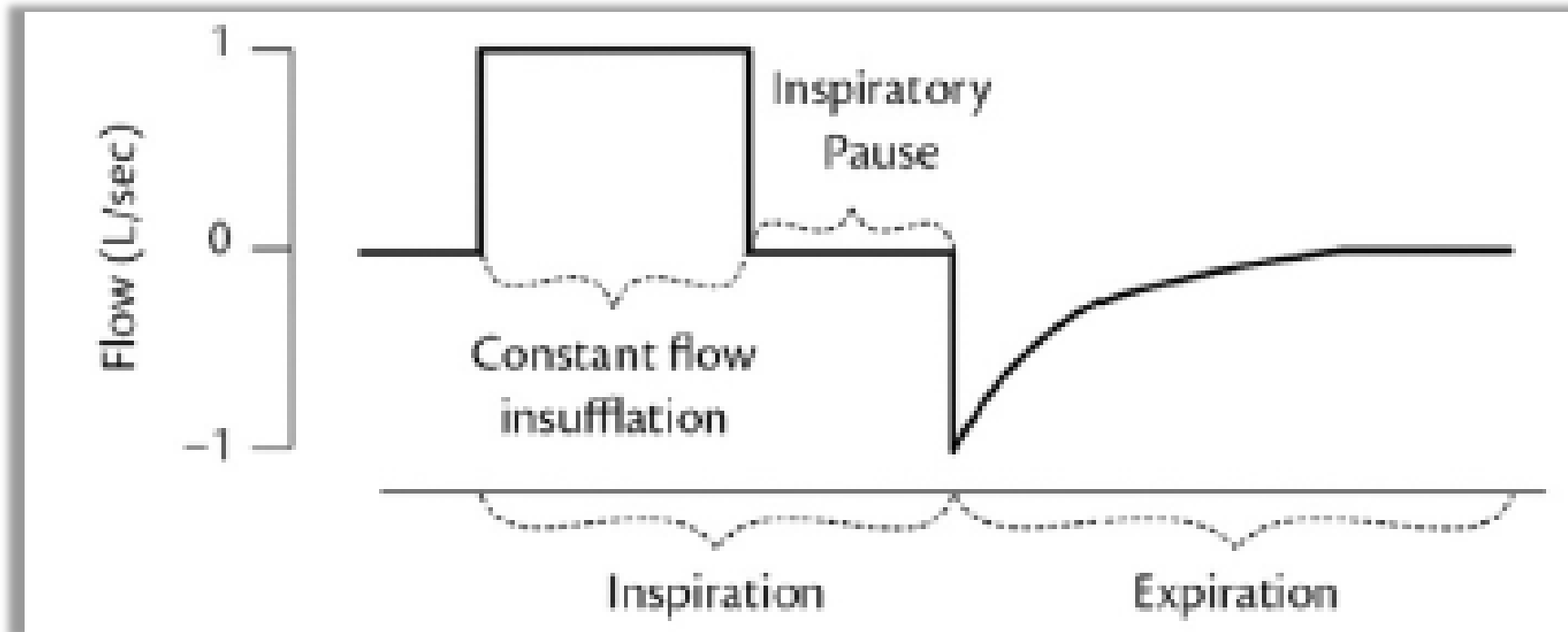


- Medida do strain
- Representa o risco de volutrauma
- Quanto maior a DP, maior a MP
- Associação com mortalidade em SDRA

Fluxo e volume

- Fluxo inspiratório

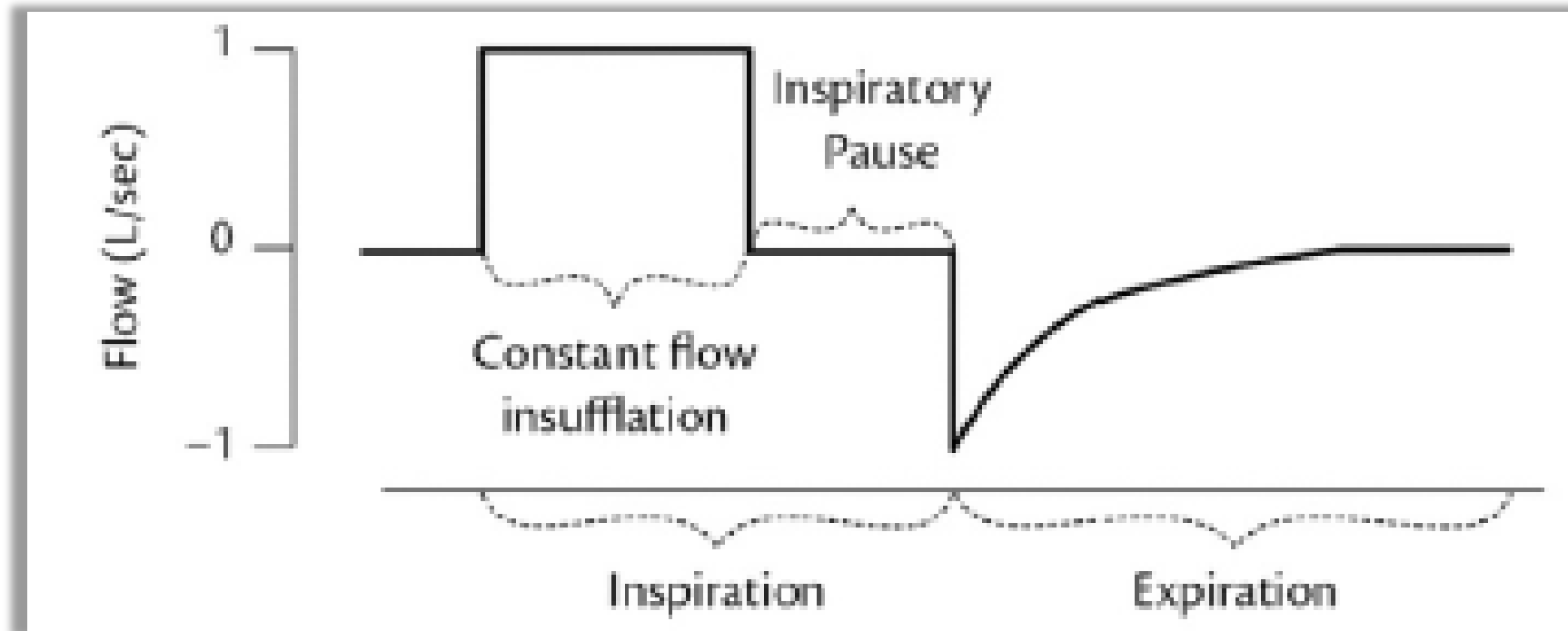
$$\text{Peak flow} = (\text{set } P_{PEAK} - PEEP_{TOT}) / R_{INSP}$$



Fluxo e volume

- Fluxo expiratório

- ✓ Depende da P_{alv} , R_{aw} e do tempo gasto desde o início da exalação



Fluxo e volume

- **Volume**

- ✓ A maioria dos ventiladores não mede o volume diretamente, mas deriva isso da integração do fluxo
- ✓ Como o fluxo geralmente não é medido diretamente na via aérea proximal, o volume expirado é menor que o volume inspirado
- ✓ Os ventiladores modernos corrigem o volume para compressão do circuito, que pode ser de 0,5 a 1,5 mL/cmH₂O

- **Medições derivadas**

- ✓ Ajuste o ventilador no modo VCV com onda de fluxo quadrada (constante)
- ✓ Cuidado para minimizar os esforços respiratórios do paciente, o que interfere nas medidas

Fluxo e volume

- Complacência

- ✓ Fundamental para o manejo do ventilador em pacientes com e sem doença pulmonar
- ✓ A complacência estática do sistema respiratório (C_{rs}) é a carga de pressão exercida no pulmão para qualquer alteração de volume
- ✓ Valores normais: 50 a 70 mL/cmH₂O

$$C_{rs} = \Delta V / \Delta P = VT / \text{Plateau Pressure (Pplat)} - PEEP$$

Fluxo e volume

- **Complacência**

- ✓ *Limitações*

- é medida em apenas um VC
 - assume que o sistema respiratório é um único compartimento, o que pode subestimar a complexidade das complacências regionais em situações clínicas com grande heterogeneidade
 - não distingue complacência pulmonar e da parede torácica (requer medição da pressão pleural)

Pode-se suspeitar de contribuição significativa da parede torácica para uma complacência baixa na presença de obesidade mórbida, distensão abdominal, cintas torácicas apertadas e grandes derrames pleurais

Fluxo e volume

- Resistência das vias aéreas

- ✓ Reflete a resistência à ventilação imposta pelas vias aéreas, bem como pelo tubo endotraqueal
- ✓ A resistência imposta pelo circuito do ventilador (geralmente mínima) não faz parte desta medida
- ✓ Afetada pelo fluxo, volume pulmonar e fase da respiração
- ✓ As forças de resistência desaparecem antes de atingir o pulmão profundo e não estão presentes nos alvéolos, não contribuindo, portanto, para o risco de VILI

$$R_I = (PIP - P_{plat}) / V_I$$

$$R_E = (P_{plat} - PEEP) / V_{EXH}$$

Fluxo e volume

- Resistência das vias aéreas

- ✓ Causas comuns de aumento

- Broncoespasmo
 - Secreções
 - TOT de pequeno calibre

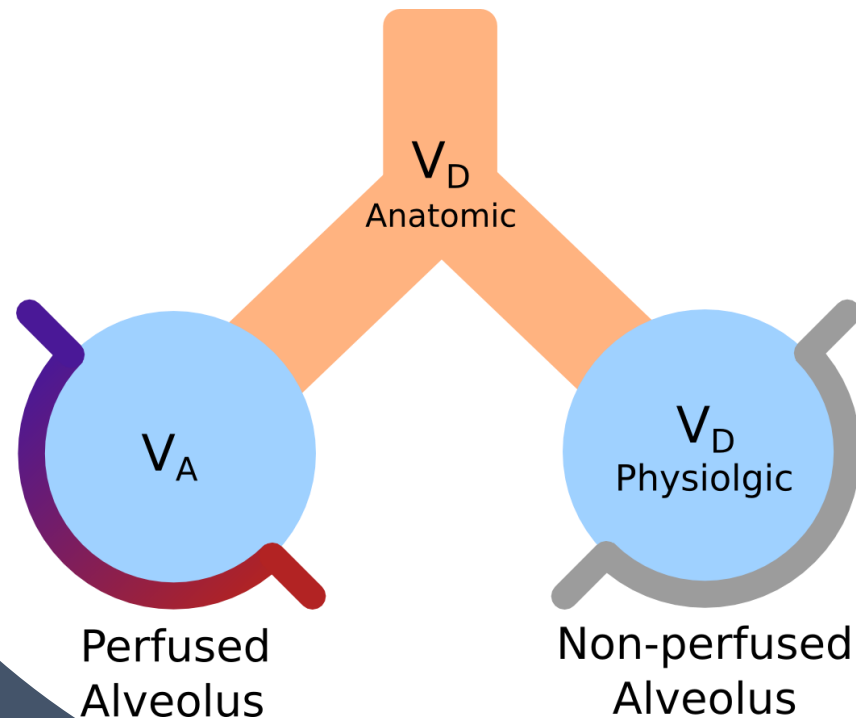
- ✓ Valor: menor que 10 cmH₂O/L/s

- ✓ Raw inspiratório < Raw expiratório: aumento do diâmetro das vias aéreas durante a inspiração (DPOC e hiperinsuflação dinâmica)

- ✓ Não pode ser medida em condições de fluxo variável

Monitorização avançada

- ✓ Aproximadamente 33% de cada respiração não participa das trocas gasosas
- ✓ Média de 2 mL/kg de peso corporal ideal



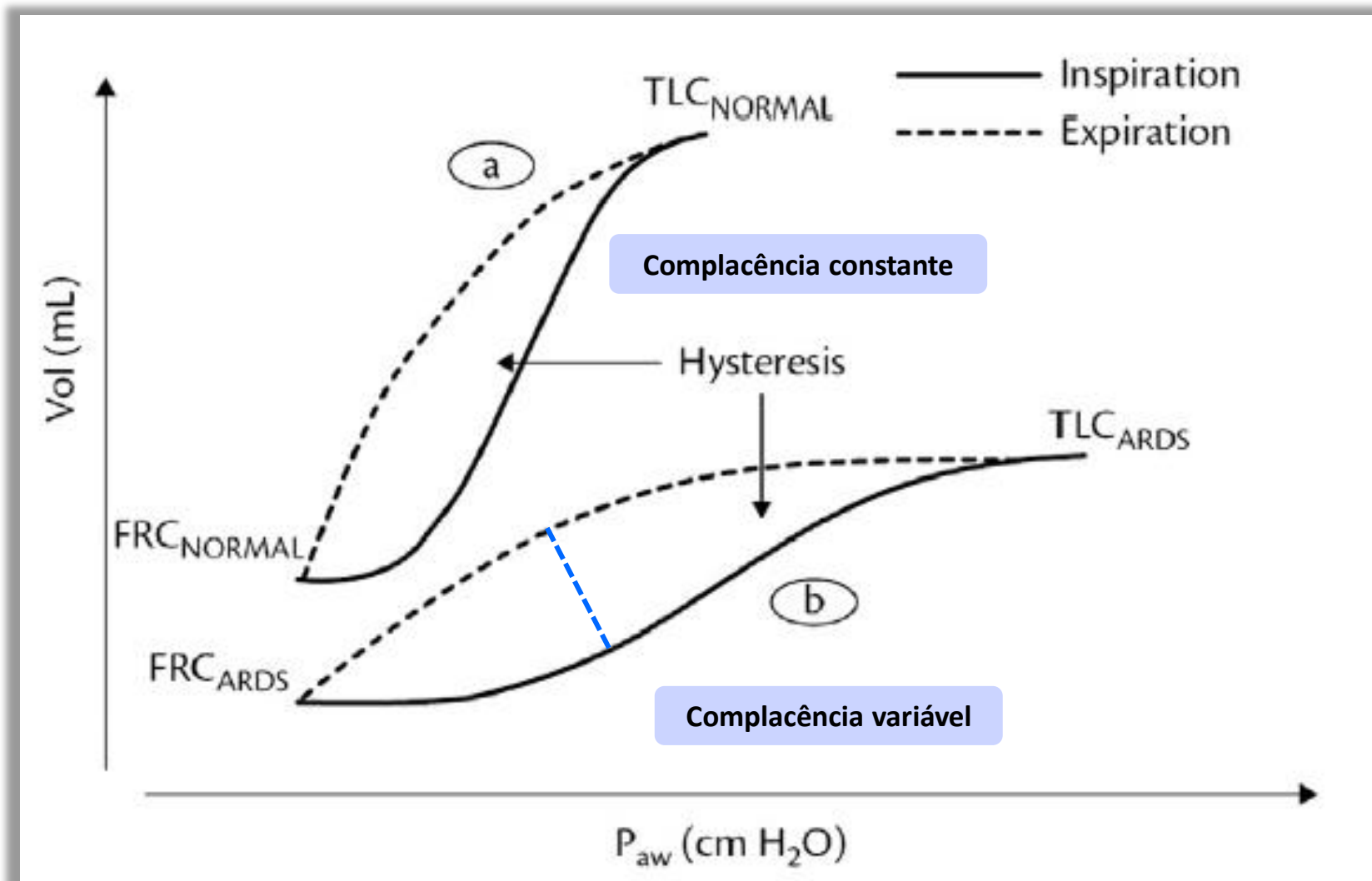
- ✓ Fração V_D/V_T

- ✓ Equação de Enghoff –Bohr

$$V_D/V_T = (P_aCO_2 - P_eCO_2)/P_aCO_2$$

Monitorização avançada

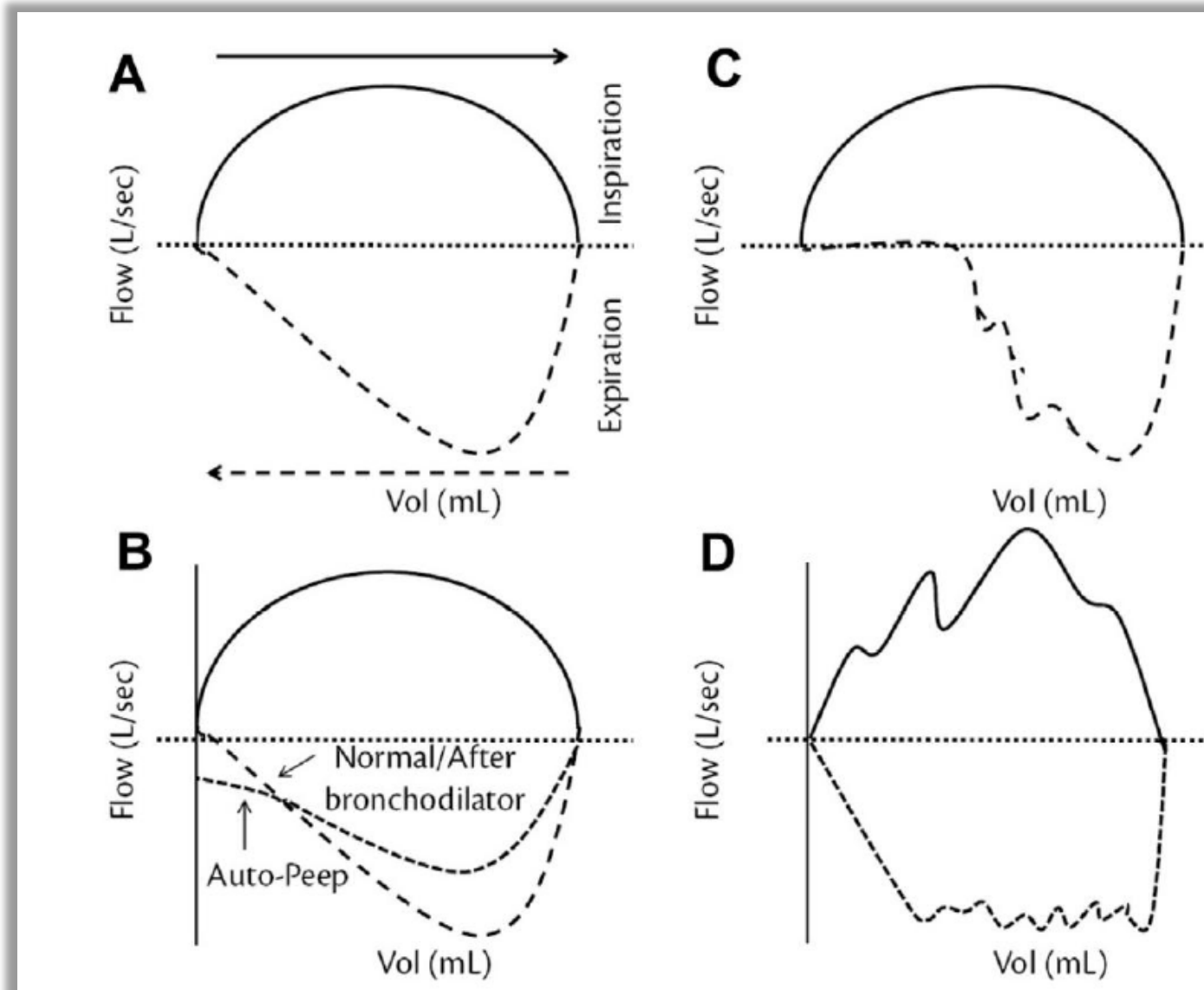
- Loop P-V



PCV
Alto VC

Monitorização avançada

- Loop F-V



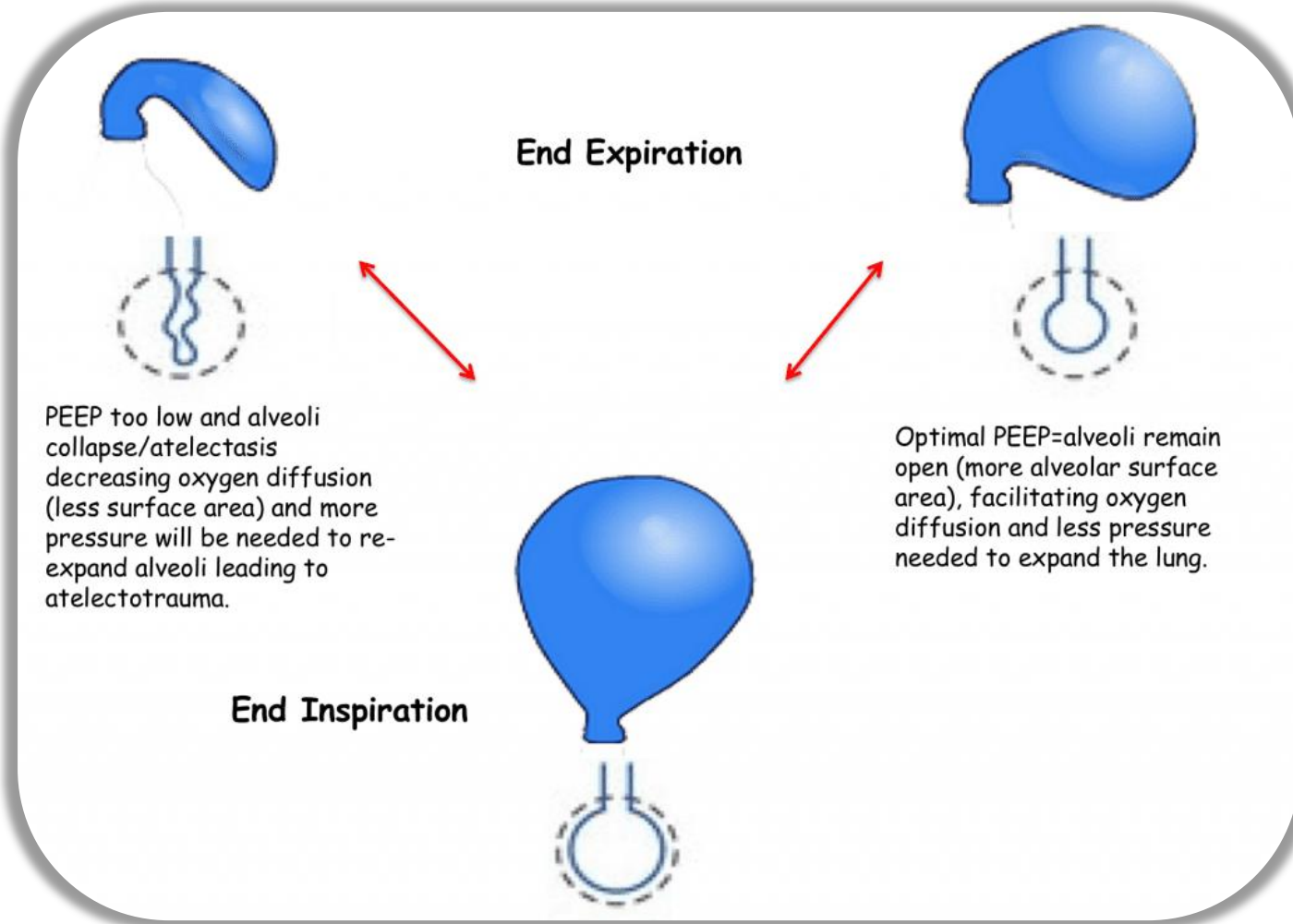
PEEP

- Pressão expiratória final que deve evitar gasto energético prejudicial ao pulmão

Fornecer níveis de PEEP suficientes para manter o recrutamento alveolar é fundamental para a ventilação protetora

- PEEP elevada → hiperdistensão, mesmo com baixo VC
- Evitar a hiperdistensão cíclica e o fechamento/reabertura das unidades pulmonares

PEEP

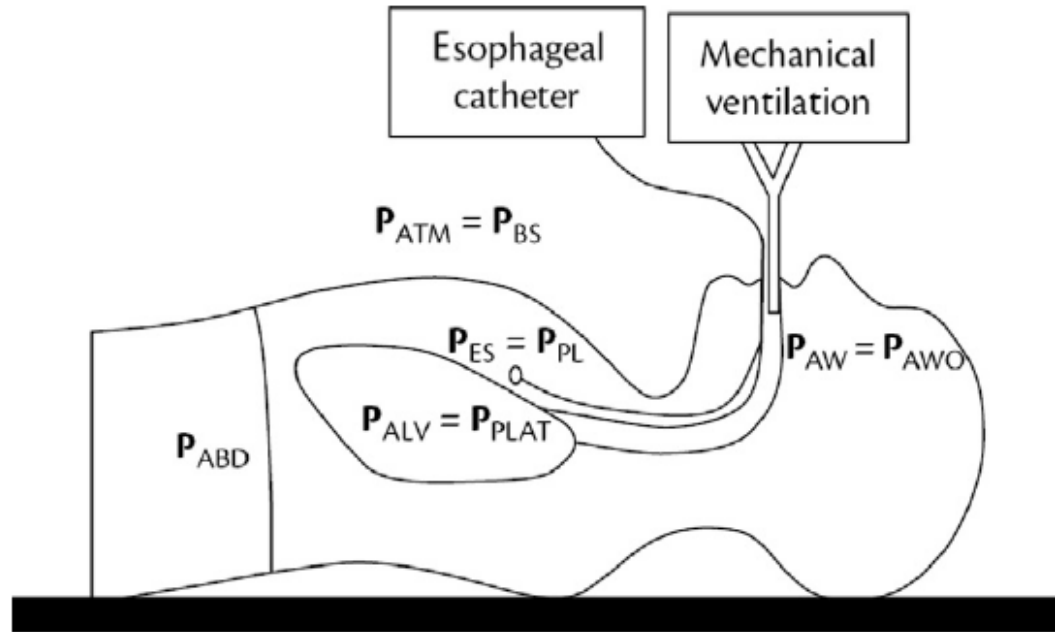


A PEEP deve ser determinada individualmente para cada paciente

A menor soma de colapso e hiperdistensão será a PEEP ótima, que levará à menor lesão pulmonar

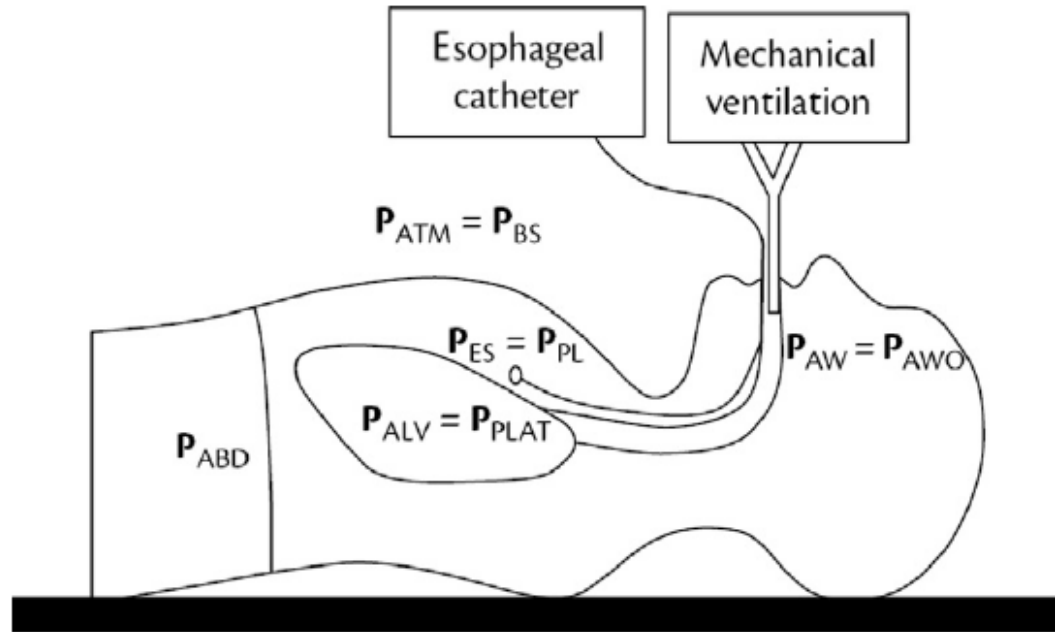
Complacência e DP são as melhores ferramentas disponíveis à beira do leito para monitorar a perda de aeração, strain dinâmico e recrutamento induzido por PEEP

Pressão intratorácica ou pleural



- Complacência pulmonar e da parede torácica
- Quantificar auto-PEEP e WOB durante os modos de ventilação assistida
- Avaliar o grau de disfunção diafragmática

Pressão transpulmonar



$$P_{TP} = P_{ALV} - P_{PL}$$

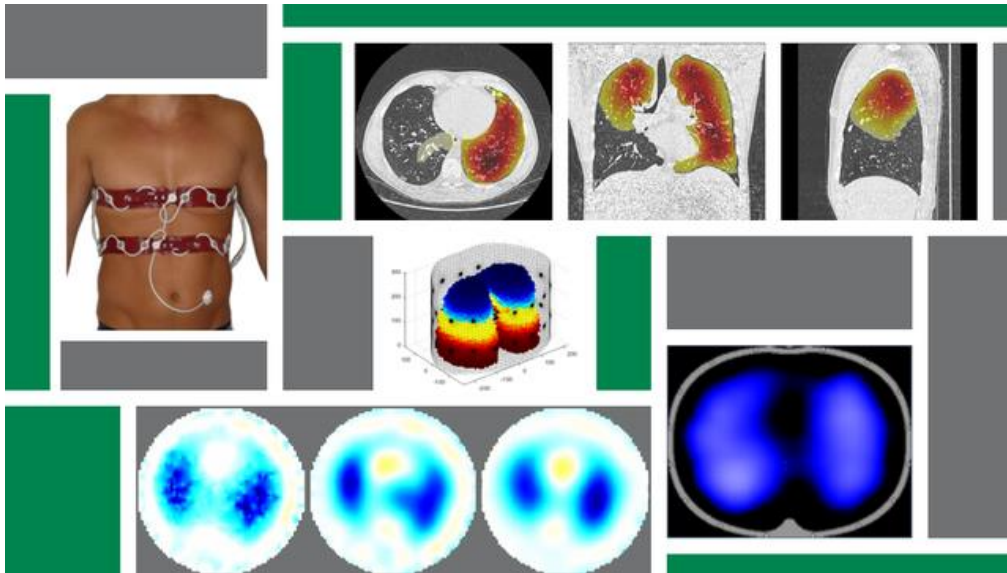


Pplato



Peso

Tomografia de impedância elétrica



- Técnica de imagem não invasiva e livre de radiação que utiliza um mínimo de 16 a 32 eletrodos posicionados ao redor do tórax.
- Fornece imagens dinâmicas, ciclo a ciclo, da distribuição regional da ventilação por meio da medição das alterações de impedância nas regiões pulmonares
- Pode detectar as alterações na impedância pulmonar associadas a manobra de recrutamento e teste de PEEP incremental ou decremental, permitindo a identificação do nível de PEEP em que a ventilação é mais homogênea

VM em condições especiais

- Ventilação espontânea

$$P_{AW} + (P_{MUS} - PEEP_{TOT}) = (tidal\ volume / compliance) + (flow \times resistance)$$

- **Modos pressóricos:** aumento do PMUS não afeta a PAW, mas aumenta o volume e o fluxo (ou seja, deforma as curvas de volume e fluxo).
- **Modos volumétricos:** aumento do PMUS diminui a PAW (ou seja, deforma a curva de pressão), mas não afeta o volume ou o fluxo
- PMUS deve exceder PEEPTOT para que a PAW diminua (ou o fluxo aumente) o suficiente para desencadear a inspiração. Caso contrário, ocorre assincronia do tipo disparo ineficaz

VM em condições especiais

- Aumento da PIA
 - Medida por meio de cateter na bexiga
 - Valor normal: 5 mmHg (aumenta durante a inspiração com a contração diafragmática)
 - **VM:** aumento da PIA resulta em diminuição da complacência com achatamento e um deslocamento para a direita do loop P-V (devido à redução da complacência da parede torácica)
 - Pacientes com SDRA profundamente sedados, o diafragma é passivo e move-se para cima na caixa torácica, transmitindo aumento da PIA para os lobos inferiores do pulmão, causando atelectasia compressiva

Pontos clínicos importantes

- Sempre avalie as curvas pressão-tempo e fluxo-tempo do paciente em combinação com sua avaliação clínica
- Use modalidades de imagem adicionais, como exames radiológicos, ultra-som e TIE
- As curvas de pressão-volume fornecem informações sobre complacência e capacidade de recrutamento
- Tenha em mente as pressões seguras das vias aéreas: idealmente $P_{plat} < 30 \text{ cmH}_2\text{O}$, ou ainda menor em pacientes com SDRA e $DP < 15 \text{ cmH}_2\text{O}$
- A DP é uma medida de energia prejudicial ao pulmão e representa um atalho atrativo para a equação do movimento, pois combina as variáveis P_{plat} (forças inspiratórias) e PEEP (forças expiratórias)
- A complacência ideal demonstra DP ideal, recrutamento alveolar, relação V/Q e homogeneidade e, portanto, previne VILI

Obrigado

