

Problema 3.1

Um combustível sólido utilizado numa caldeira apresenta a seguinte composição, dada em massa seca:

- Carbono = 51 %
- Hidrogénio = 8 %
- Nitrogénio = 3 %
- Oxigénio = 31 %
- Enxofre = 2 %
- Cinzas = 5 %
- Humidade = 6 %

Sabendo que a combustão decorre com 25 % de excesso de ar, determinar:

1. A massa de trabalho do combustível;
2. O volume teórico do ar;
3. O volume teórico dos gases biatómicos;
4. O volume teórico de vapor de água;
5. O volume teórico dos gases triatómicos;
6. O volume real dos gases biatómicos;
7. O volume real de vapor de água;
8. O volume do oxigénio excedente;
9. O volume total dos gases de combustão.

Problema 3.2

Num forno industrial queima-se um combustível líquido cuja composição, dada em massa de combustível, é:

- Carbono = 84 %
- Hidrogénio = 11 %
- Nitrogénio = 1 %
- Oxigénio = 2 %

- Enxofre = 2 %
- Cinzas = 0 %
- Humidade = 1 %

O processo opera com 15 % de excesso de ar.

Determinar:

1. A massa de trabalho do combustível;
2. O volume teórico do ar;
3. O volume teórico dos gases biatómicos;
4. O volume teórico de vapor de água;
5. O volume teórico dos gases triatómicos;
6. O volume real dos gases biatómicos;
7. O volume real de vapor de água;
8. O volume do oxigénio excedente;
9. O volume total dos gases de combustão.

Problema 3.3

Uma central térmica utiliza biomassa cuja composição, dada em massa seca, é:

- Carbono = 48 %
- Hidrogénio = 7 %
- Nitrogénio = 2 %
- Oxigénio = 37 %
- Enxofre = 1 %
- Cinzas = 5 %
- Humidade = 12 %

Sabendo que a combustão é realizada com 40 % de excesso de ar, determinar:

1. A massa de trabalho do combustível;
2. O volume teórico do ar;
3. O volume teórico dos gases biatómicos;

4. O volume teórico de vapor de água;
 5. O volume teórico dos gases triatômicos;
 6. O volume real dos gases biatômicos;
 7. O volume real de vapor de água;
 8. O volume do oxigénio excedente;
 9. O volume total dos gases de combustão.
-

Problema 3.4

Considere um combustível sólido utilizado numa fornalha industrial com a seguinte composição, dada em massa de combustível:

- Carbono = 55 %
- Hidrogénio = 6 %
- Nitrogénio = 2 %
- Oxigénio = 24 %
- Enxofre = 3 %
- Cinzas = 10 %
- Humidade = 8 %

A combustão ocorre com 30% de excesso de ar.

Determinar:

1. A massa de trabalho do combustível;
2. O volume teórico do ar;
3. O volume teórico dos gases biatômicos;
4. O volume teórico de vapor de água;
5. O volume teórico dos gases triatômicos;
6. O volume real dos gases biatômicos;
7. O volume real de vapor de água;
8. O volume do oxigénio excedente;
9. O volume total dos gases de combustão.

Formulário da Aula Prática 3

Cálculos Estequiométricos da Combustão

1. Conversão entre massas

Massa seca → Massa de trabalho

$$X_t = X_d \left(\frac{100 - W}{100} \right)$$

onde

- (X_d) = percentagem na massa seca
- (X_t) = percentagem na massa de trabalho
- (W) = humidade (%)

Massa de combustível → Massa de trabalho

$$X_t = X_c \left(\frac{100 - W - A}{100} \right) [$$

onde

- (A) = cinzas
- (W) = humidade

2. Coeficiente de excesso de ar

$$\alpha = 1 + \frac{EA}{100}$$

onde

EA = excesso de ar (%)

3. Volume teórico do ar

Para combustíveis sólidos e líquidos

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C + 0,375S) + 0,265H - 0,0333O \quad (\text{m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}})$$

4. Volume teórico dos gases biatômicos

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_{ar}^0 + 0,008N \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

5. Volume teórico de vapor de água

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H + 0,0124W + 0,0161V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

6. Volume teórico dos gases triatômicos

$$V_{RO_2} = 0,01866(C + 0,375S) \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

7. Volume real dos gases biatômicos

Pode usar-se qualquer uma das formas.

Forma 1

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Forma 2

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V_{ar}^0 + 0,008N \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

8. Volume real de vapor de água

Forma 1

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Forma 2

$$V_{H_2O} = 0,111H + 0,0124W + 0,0161\alpha V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

9. Volume real dos gases triatômicos

Na combustão completa

$$V_{RO_2} = V_{RO_2}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

10. Volume de CO₂

$$V_{CO_2} = 0,01866C \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

11. Volume de SO₂

$$V_{SO_2} = 0,00699S \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

12. Volume do oxigénio excedente

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

13. Volume total dos gases de combustão

Gases húmidos

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Gases secos

$$V_{g,seco} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Sequência de resolução (algoritmo)

Em todos os problemas da Aula 3 recomenda-se seguir sempre esta ordem:

1. Converter a composição para **massa de trabalho**.
2. Calcular o **coeficiente de excesso de ar** α
3. Determinar o **volume teórico do ar**.
4. Calcular o **volume teórico dos gases biatômicos**.
5. Calcular o **volume teórico do vapor de água**.
6. Calcular o **volume teórico dos gases triatômicos**.
7. Determinar o **volume real dos gases biatômicos**.
8. Determinar o **volume real do vapor de água**.
9. Calcular o **volume do oxigénio excedente**.
10. Calcular o **volume total dos gases de combustão**.

Problema 3.1

Composição em **massa seca**:

Componente	Valor
Carbono, C ^s	51%
Hidrogénio, H ^s	8%
Nitrogénio, N ^s	3%
Oxigénio, O ^s	31%
Enxofre, S ^s	2%
Cinzas, A ^s	5%
Humidade, W ^t	6%
Excesso de ar, EA	25%

O coeficiente de excesso de ar é:

$$\alpha = 1 + EA/100$$

$$\alpha = 1 + 25/100$$

$$\alpha = 1,25$$

1. Massa de trabalho do combustível

A composição fornecida está em massa seca. Para converter cada elemento para massa de trabalho, utiliza-se:

$$X^t = X^s \times (100 - W^t)/100$$

Como a humidade é de 6%:

$$X^t = X^s \times (100 - 6)/100$$

$$X^t = X^s \times 0,94$$

Carbono

$$C^t = 51 \times 0,94$$

$$C^t = 47,94\%$$

Hidrogénio

$$H^t = 8 \times 0,94$$

$$H^t = 7,52\%$$

Nitrogénio

$$N^t = 3 \times 0,94$$

$$N^t = 2,82\%$$

Oxigénio

$$O^t = 31 \times 0,94$$

$$O^t = 29,14\%$$

Enxofre

$$S^t = 2 \times 0,94$$

$$S^t = 1,88\%$$

Cinzas

$$A^t = 5 \times 0,94$$

$$A^t = 4,70\%$$

A humidade na massa de trabalho é:

$$W^t = 6,00\%$$

Verificação

$$47,94 + 7,52 + 2,82 + 29,14 + 1,88 + 4,70 + 6,00 = 100\%$$

Assim, a composição em massa de trabalho é:

Componente	Massa de trabalho
C ^t	47,94%
H ^t	7,52%
N ^t	2,82%
O ^t	29,14%
S ^t	1,88%

Componente	Massa de trabalho
A ^t	4,70%
W ^t	6,00%
Total	100,00%

2. Volume teórico do ar

Para um combustível sólido ou líquido:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V^0_{\text{ar}} &= 0,0889(47,94 + 0,375 \times 1,88) \\ &\quad + 0,265 \times 7,52 \\ &\quad - 0,0333 \times 29,14 \end{aligned}$$

Primeiro:

$$0,375 \times 1,88 = 0,705$$

$$47,94 + 0,705 = 48,645$$

Então:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889 \times 48,645 + 0,265 \times 7,52 - 0,0333 \times 29,14$$

$$V^0_{\text{ar}} = 4,3245 + 1,9928 - 0,9704$$

$$\mathbf{V^0_{\text{ar}} = 5,347 \text{ Nm}^3 \text{ de ar/kg de combustível}}$$

3. Volume teórico dos gases biatômicos

O volume teórico dos gases biatômicos é dado por:

$$V^0_{\text{N}_2} = 0,79V^0_{\text{ar}} + 0,008N^t$$

Substituindo:

$$V^0_{\text{N}_2} = 0,79 \times 5,347 + 0,008 \times 2,82$$

$$V^0_{\text{N}_2} = 4,2241 + 0,0226$$

$$\mathbf{V^0_{\text{N}_2} = 4,247 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

4. Volume teórico de vapor de água

O volume teórico de vapor de água é:

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,111\text{H}^t + 0,0124\text{W}^t + 0,0161\text{V}^0\text{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V^0\text{H}_2\text{O} &= 0,111 \times 7,52 \\ &\quad + 0,0124 \times 6 \\ &\quad + 0,0161 \times 5,347 \end{aligned}$$

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,8347 + 0,0744 + 0,0861$$

$$\mathbf{V^0\text{H}_2\text{O} = 0,995 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

5. Volume teórico dos gases triatômicos

O volume dos gases triatômicos é:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(\text{C}^t + 0,375\text{S}^t)$$

Substituindo:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(47,94 + 0,375 \times 1,88)$$

$$\text{VRO}_2 = 0,01866 \times 48,645$$

$$\mathbf{\text{VRO}_2 = 0,908 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Este volume corresponde à soma:

$$\text{VRO}_2 = \text{VCO}_2 + \text{VSO}_2$$

Resultados teóricos obtidos

Grandeza	Resultado
Coeficiente de excesso de ar, α	1,25
Volume teórico do ar, V^0ar	5,347 Nm^3/kg
Volume teórico dos gases biatômicos, V^0N_2	4,247 Nm^3/kg
Volume teórico de vapor de água, $\text{V}^0\text{H}_2\text{O}$	0,995 Nm^3/kg
Volume dos gases triatômicos, VRO_2	0,908 Nm^3/kg

A primeira parte da resolução fica, assim, concluída. A seguir entram os volumes reais, considerando os **25% de excesso de ar**.

$$\alpha = 1,25$$

$$V^0_{ar} = 5,347 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{N_2} = 4,247 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{H_2O} = 0,995 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{RO_2} = 0,908 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6. Volume real dos gases biatômicos

O volume real dos gases biatômicos é calculado por:

$$VN_2 = V^0_{N_2} + 0,79(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Como:

$$\alpha - 1 = 1,25 - 1 = 0,25$$

Substituindo:

$$VN_2 = 4,247 + 0,79 \times 0,25 \times 5,347$$

$$VN_2 = 4,247 + 1,056$$

$$\mathbf{VN_2 = 5,303 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Também se pode calcular directamente por:

$$VN_2 = 0,79\alpha V^0_{ar} + 0,008N^t$$

$$VN_2 = 0,79 \times 1,25 \times 5,347 + 0,008 \times 2,82$$

$$VN_2 = 5,280 + 0,023$$

$$\mathbf{VN_2 = 5,303 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

7. Volume real de vapor de água

O vapor de água adicional é introduzido com o excesso de ar. Assim:

$$V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0,0161(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$V_{H_2O} = 0,995 + 0,0161 \times 0,25 \times 5,347$$

$$V_{H_2O} = 0,995 + 0,0215$$

$$\mathbf{V_{H_2O} = 1,017 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Pode igualmente escrever-se:

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124W^t + 0,0161\alpha V^0_{ar}$$

$$V_{H_2O} = 0,111 \times 7,52 + 0,0124 \times 6 + 0,0161 \times 1,25 \times 5,347$$

$$V_{H_2O} = 0,8347 + 0,0744 + 0,1076$$

$$V_{H_2O} = 1,017 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

8. Volume real dos gases triatômicos

Numa combustão completa, o excesso de ar não altera a quantidade de carbono e enxofre queimados. Portanto:

$$V_{RO_2} = V^0_{RO_2}$$

$$V_{RO_2} = 0,908 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Este volume é constituído por:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$$

Separação dos gases triatômicos

Dióxido de carbono

$$V_{CO_2} = 0,01866 C^t$$

$$V_{CO_2} = 0,01866 \times 47,94$$

$$V_{CO_2} = 0,895 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Dióxido de enxofre

$$V_{SO_2} = 0,00699 S^t$$

$$V_{SO_2} = 0,00699 \times 1,88$$

$$V_{SO_2} = 0,013 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Verificação:

$$V_{RO_2} = 0,895 + 0,013$$

$$V_{RO_2} = 0,908 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

9. Volume do oxigénio excedente

O volume de oxigénio que não participa na combustão é:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$V_{O_2} = 0,21 \times 0,25 \times 5,347$$

$$V_{O_2} = 0,2807$$

$$VO_2 = 0,281 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

10. Volume total dos gases de combustão

O volume total húmido dos gases de combustão é a soma de:

- gases triatômicos;
- gases biatômicos;
- vapor de água;
- oxigénio excedente.

Assim:

$$Vg = VRO_2 + VN_2 + VH_2O + VO_2$$

Substituindo:

$$Vg = 0,908 + 5,303 + 1,017 + 0,281$$

$$Vg = 7,509 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Volume dos gases secos

Excluindo o vapor de água:

$$Vg,s = VRO_2 + VN_2 + VO_2$$

$$Vg,s = 0,908 + 5,303 + 0,281$$

$$Vg,s = 6,492 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Resultados finais do Problema 3.1

Grandeza	Resultado
Massa de trabalho do carbono, C^t	47,94%
Massa de trabalho do hidrogénio, H^t	7,52%
Massa de trabalho do nitrogénio, N^t	2,82%
Massa de trabalho do oxigénio, O^t	29,14%
Massa de trabalho do enxofre, S^t	1,88%

Grandeza	Resultado
Massa de trabalho das cinzas, A^t	4,70%
Humidade, W^t	6,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,25
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	5,347 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0_{N_2}$	4,247 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,995 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatômicos, V_{RO_2}	0,908 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatômicos, V_{N_2}	5,303 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	1,017 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,281 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	6,492 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	7,509 Nm³/kg

Problema 3.2

Dados

Composição dada em **massa de combustível**:

Componente	Valor
Carbono, C ^c	84%
Hidrogénio, H ^c	11%
Nitrogénio, N ^c	1%
Oxigénio, O ^c	2%
Enxofre, S ^c	2%
Cinzas, A ^t	0%
Humidade, W ^t	1%
Excesso de ar, EA	15%

O coeficiente de excesso de ar é:

$$\alpha = 1 + EA/100$$

$$\alpha = 1 + 15/100$$

$$\alpha = 1,15$$

1. Massa de trabalho do combustível

Como a composição é dada em massa de combustível, a conversão para massa de trabalho é feita por:

$$X^t = X^c \times (100 - A^t - W^t)/100$$

Como:

$$A^t = 0\%$$

$$W^t = 1\%$$

tem-se:

$$X^t = X^c \times 0,99$$

Carbono

$$C^t = 84 \times 0,99$$

$$C^t = 83,16\%$$

Hidrogénio

$$H^t = 11 \times 0,99$$

$$H^t = 10,89\%$$

Nitrogénio

$$N^t = 1 \times 0,99$$

$$N^t = 0,99\%$$

Oxigénio

$$O^t = 2 \times 0,99$$

$$O^t = 1,98\%$$

Enxofre

$$S^t = 2 \times 0,99$$

$$S^t = 1,98\%$$

Cinzas e humidade

$$A^t = 0\%$$

$$W^t = 1\%$$

Verificação

$$83,16 + 10,89 + 0,99 + 1,98 + 1,98 + 0 + 1 = 100\%$$

A composição em massa de trabalho é, portanto:

Componente	Massa de trabalho
C^t	83,16%
H^t	10,89%
N^t	0,99%
O^t	1,98%
S^t	1,98%

Componente	Massa de trabalho
A ^t	0,00%
W ^t	1,00%
Total	100,00%

2. Volume teórico do ar

Para combustíveis sólidos ou líquidos:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t$$

Substituindo:

$$\begin{aligned}
 V^0_{\text{ar}} &= 0,0889(83,16 + 0,375 \times 1,98) \\
 &\quad + 0,265 \times 10,89 \\
 &\quad - 0,0333 \times 1,98
 \end{aligned}$$

Calculando primeiro a contribuição do enxofre:

$$0,375 \times 1,98 = 0,7425$$

$$83,16 + 0,7425 = 83,9025$$

Assim:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889 \times 83,9025 + 0,265 \times 10,89 - 0,0333 \times 1,98$$

$$V^0_{\text{ar}} = 7,4589 + 2,8859 - 0,0659$$

$$V^0_{\text{ar}} = 10,279 \text{ Nm}^3 \text{ de ar/kg de combustível}$$

3. Volume teórico dos gases biatômicos

O volume teórico dos gases biatômicos é:

$$V^0_{N_2} = 0,79V^0_{\text{ar}} + 0,008N^t$$

Substituindo:

$$V^0_{N_2} = 0,79 \times 10,279 + 0,008 \times 0,99$$

$$V^0_{N_2} = 8,1203 + 0,0079$$

$$V^0_{N_2} = 8,128 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

4. Volume teórico de vapor de água

A expressão é:

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,111\text{H}^t + 0,0124\text{W}^t + 0,0161\text{V}^0\text{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V^0\text{H}_2\text{O} &= 0,111 \times 10,89 \\ &\quad + 0,0124 \times 1 \\ &\quad + 0,0161 \times 10,279 \end{aligned}$$

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 1,2088 + 0,0124 + 0,1655$$

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 1,387 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

5. Volume teórico dos gases triatômicos

O volume dos gases triatômicos é:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(\text{C}^t + 0,375\text{S}^t)$$

Substituindo:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(83,16 + 0,375 \times 1,98)$$

$$\text{VRO}_2 = 0,01866 \times 83,9025$$

$$\text{VRO}_2 = 1,566 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Este volume corresponde a:

$$\text{VRO}_2 = \text{VCO}_2 + \text{VSO}_2$$

Resultados teóricos

Grandeza	Resultado
Coeficiente de excesso de ar, α	1,15
Volume teórico do ar, $V^0\text{ar}$	10,279 Nm^3/kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0\text{N}_2$	8,128 Nm^3/kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0\text{H}_2\text{O}$	1,387 Nm^3/kg
Volume dos gases triatômicos, VRO_2	1,566 Nm^3/kg

A etapa seguinte é calcular os volumes reais, aplicando os **15% de excesso de ar**.

Continuemos com a segunda parte da resolução do **Problema 3.5**, considerando:

$$\alpha = 1,15$$

$$V^0_{ar} = 10,279 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{N_2} = 8,128 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{H_2O} = 1,387 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{RO_2} = 1,566 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6. Volume real dos gases biatômicos

O volume real dos gases biatômicos calcula-se por:

$$VN_2 = V^0_{N_2} + 0,79(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Como:

$$\alpha - 1 = 1,15 - 1 = 0,15$$

Substituindo:

$$VN_2 = 8,128 + 0,79 \times 0,15 \times 10,279$$

$$VN_2 = 8,128 + 1,218$$

$$\mathbf{VN_2 = 9,346 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Também se pode usar directamente:

$$VN_2 = 0,79\alpha V^0_{ar} + 0,008N^t$$

$$VN_2 = 0,79 \times 1,15 \times 10,279 + 0,008 \times 0,99$$

$$\mathbf{VN_2 = 9,346 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

7. Volume real de vapor de água

O volume real de vapor de água é:

$$V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0,0161(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$V_{H_2O} = 1,387 + 0,0161 \times 0,15 \times 10,279$$

$$V_{H_2O} = 1,387 + 0,025$$

$$\mathbf{V_{H_2O} = 1,412 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Também pode ser calculado por:

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124W^t + 0,0161\alpha V^0_{ar}$$

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,111 \times 10,89 \\ &+ 0,0124 \times 1 \\ &+ 0,0161 \times 1,15 \times 10,279 \end{aligned}$$

$$V_{H_2O} = 1,2088 + 0,0124 + 0,1903$$

$$\mathbf{V_{H_2O} = 1,412 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

8. Volume real dos gases triatômicos

Numa combustão completa, o excesso de ar não altera a quantidade de carbono e de enxofre queimados. Assim:

$$V_{RO_2} = V^0_{RO_2}$$

$$\mathbf{V_{RO_2} = 1,566 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Este volume é constituído por dióxido de carbono e dióxido de enxofre:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$$

Volume de dióxido de carbono

$$V_{CO_2} = 0,01866C^t$$

$$V_{CO_2} = 0,01866 \times 83,16$$

$$\mathbf{V_{CO_2} = 1,552 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

Volume de dióxido de enxofre

$$V_{SO_2} = 0,00699S^t$$

$$V_{SO_2} = 0,00699 \times 1,98$$

$$\mathbf{V_{SO_2} = 0,014 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

Verificação:

$$V_{RO_2} = 1,552 + 0,014$$

$$\mathbf{V_{RO_2} = 1,566 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

9. Volume do oxigénio excedente

O oxigénio excedente é calculado por:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$VO_2 = 0,21 \times 0,15 \times 10,279$$

$$VO_2 = 0,324$$

$$VO_2 = 0,324 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

10. Volume total dos gases de combustão

O volume total húmido dos gases de combustão é:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + VO_2$$

Substituindo:

$$V_g = 1,566 + 9,346 + 1,412 + 0,324$$

$$V_g = 12,648 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Volume dos gases secos

Excluindo o vapor de água:

$$V_{g,s} = V_{RO_2} + V_{N_2} + VO_2$$

$$V_{g,s} = 1,566 + 9,346 + 0,324$$

$$V_{g,s} = 11,236 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Resultados finais do Problema 3.2

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	83,16%
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	10,89%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	0,99%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	1,98%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	1,98%
Cinzas, A^t	0,00%

Grandeza	Resultado
Humidade, W^t	1,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,15
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	10,279 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0_{N_2}$	8,128 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	1,387 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatômicos, V_{RO_2}	1,566 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatômicos, V_{N_2}	9,346 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	1,412 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, VO_2	0,324 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	11,236 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	12,648 Nm ³ /kg

Problema 3.3

Dados:

Composição dada em **massa seca**:

Componente	Valor
Carbono, C^s	48%
Hidrogénio, H^s	7%
Nitrogénio, N^s	2%
Oxigénio, O^s	37%
Enxofre, S^s	1%
Cinzas, A^s	5%
Humidade, W^t	12%

Componente	Valor
Excesso de ar, EA	40%

O coeficiente de excesso de ar é:

$$\alpha = 1 + EA/100$$

$$\alpha = 1 + 40/100$$

$$\alpha = 1,40$$

1. Massa de trabalho do combustível

Como a composição é dada em massa seca, utiliza-se:

$$X^t = X^s \times (100 - W^t)/100$$

Como a humidade é de 12%:

$$X^t = X^s \times 0,88$$

Carbono

$$C^t = 48 \times 0,88$$

$$C^t = 42,24\%$$

Hidrogénio

$$H^t = 7 \times 0,88$$

$$H^t = 6,16\%$$

Nitrogénio

$$N^t = 2 \times 0,88$$

$$N^t = 1,76\%$$

Oxigénio

$$O^t = 37 \times 0,88$$

$$O^t = 32,56\%$$

Enxofre

$$S^t = 1 \times 0,88$$

$$S^t = 0,88\%$$

Cinzas

$$A^t = 5 \times 0,88$$

$$A^t = 4,40\%$$

A humidade é:

$$W^t = 12,00\%$$

Verificação

$$42,24 + 6,16 + 1,76 + 32,56 + 0,88 + 4,40 + 12,00 = 100\%$$

Assim, a composição em massa de trabalho é:

Componente	Massa de trabalho
C ^t	42,24%
H ^t	6,16%
N ^t	1,76%
O ^t	32,56%
S ^t	0,88%
A ^t	4,40%
W ^t	12,00%
Total	100,00%

2. Volume teórico do ar

Para combustíveis sólidos ou líquidos:

$$V^0_{ar} = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t$$

Substituindo:

$$\begin{aligned}
 V^0_{ar} &= 0,0889(42,24 + 0,375 \times 0,88) \\
 &\quad + 0,265 \times 6,16 \\
 &\quad - 0,0333 \times 32,56
 \end{aligned}$$

Calculando:

$$0,375 \times 0,88 = 0,33$$

$$42,24 + 0,33 = 42,57$$

Logo:

$$V^0_{ar} = 0,0889 \times 42,57 + 0,265 \times 6,16 - 0,0333 \times 32,56$$

$$V^0_{ar} = 3,7845 + 1,6324 - 1,0842$$

$$\mathbf{V^0_{ar} = 4,333 \text{ Nm}^3 \text{ de ar/kg de combustível}}$$

3. Volume teórico dos gases biatômicos

O volume teórico dos gases biatômicos é:

$$V^0_{N_2} = 0,79V^0_{ar} + 0,008N^t$$

Substituindo:

$$V^0_{N_2} = 0,79 \times 4,333 + 0,008 \times 1,76$$

$$V^0_{N_2} = 3,4231 + 0,0141$$

$$\mathbf{V^0_{N_2} = 3,437 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

4. Volume teórico de vapor de água

O volume teórico de vapor de água é:

$$V^0_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124W^t + 0,0161V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V^0_{H_2O} &= 0,111 \times 6,16 \\ &\quad + 0,0124 \times 12 \\ &\quad + 0,0161 \times 4,333 \end{aligned}$$

$$V^0_{H_2O} = 0,6838 + 0,1488 + 0,0698$$

$$\mathbf{V^0_{H_2O} = 0,902 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

5. Volume teórico dos gases triatômicos

O volume dos gases triatômicos é:

$$VRO_2 = 0,01866(C^t + 0,375S^t)$$

Substituindo:

$$VRO_2 = 0,01866(42,24 + 0,375 \times 0,88)$$

$$VRO_2 = 0,01866 \times 42,57$$

$VRO_2 = 0,794 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de combustível

Este volume corresponde à soma:

$$VRO_2 = VCO_2 + VSO_2$$

Resultados teóricos do Problema 3.6

Grandeza	Resultado
Coeficiente de excesso de ar, α	1,40
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	4,333 Nm^3/kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0_{N_2}$	3,437 Nm^3/kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,902 Nm^3/kg
Volume dos gases triatômicos, VRO_2	0,794 Nm^3/kg

Na continuação calculam-se os volumes reais para **40% de excesso de ar**.

$$\alpha = 1,40$$

$$V^0_{ar} = 4,333 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{N_2} = 3,437 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V^0_{H_2O} = 0,902 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$VRO_2 = 0,794 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6. Volume real dos gases biatômicos

O volume real dos gases biatômicos calcula-se por:

$$VN_2 = V^0_{N_2} + 0,79(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Como:

$$\alpha - 1 = 1,40 - 1 = 0,40$$

Substituindo:

$$VN_2 = 3,437 + 0,79 \times 0,40 \times 4,333$$

$$VN_2 = 3,437 + 1,369$$

$$\mathbf{VN_2 = 4,806 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ de combustível}}$$

Pode também calcular-se directamente por:

$$VN_2 = 0,79\alpha V^0_{ar} + 0,008N^t$$

$$VN_2 = 0,79 \times 1,40 \times 4,333 + 0,008 \times 1,76$$

$$VN_2 = 4,792 + 0,014$$

$$VN_2 = 4,806 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

7. Volume real de vapor de água

O volume real de vapor de água é:

$$V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0,0161(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$V_{H_2O} = 0,902 + 0,0161 \times 0,40 \times 4,333$$

$$V_{H_2O} = 0,902 + 0,028$$

$$V_{H_2O} = 0,930 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Também se pode escrever:

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124W^t + 0,0161\alpha V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,111 \times 6,16 \\ &\quad + 0,0124 \times 12 \\ &\quad + 0,0161 \times 1,40 \times 4,333 \end{aligned}$$

$$V_{H_2O} = 0,684 + 0,149 + 0,098$$

$$V_{H_2O} = 0,930 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

8. Volume real dos gases triatômicos

Como se considera combustão completa, o excesso de ar não altera a quantidade de carbono e enxofre queimados.

Assim:

$$VRO_2 = V^0RO_2$$

$$VRO_2 = 0,794 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Este volume é composto por:

$$VRO_2 = VCO_2 + VSO_2$$

Volume de dióxido de carbono

$$VCO_2 = 0,01866C^t$$

$$VCO_2 = 0,01866 \times 42,24$$

$$VCO_2 = 0,788 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Volume de dióxido de enxofre

$$VSO_2 = 0,00699S^t$$

$$VSO_2 = 0,00699 \times 0,88$$

$$VSO_2 = 0,006 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Verificação:

$$VRO_2 = 0,788 + 0,006$$

$$VRO_2 = 0,794 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

9. Volume do oxigénio excedente

O volume de oxigénio excedente é:

$$VO_2 = 0,21(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$VO_2 = 0,21 \times 0,40 \times 4,333$$

$$VO_2 = 0,364$$

$$VO_2 = 0,364 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

10. Volume total dos gases de combustão

O volume total húmido dos gases de combustão calcula-se por:

$$Vg = VRO_2 + VN_2 + VH_2O + VO_2$$

Substituindo:

$$Vg = 0,794 + 4,806 + 0,930 + 0,364$$

$$Vg = 6,894 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Volume dos gases secos

Excluindo o vapor de água:

$$V_{g,s} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

$$V_{g,s} = 0,794 + 4,806 + 0,364$$

$$V_{g,s} = 5,964 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Resultados finais do Problema 3.3

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	42,24%
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	6,16%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	1,76%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	32,56%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	0,88%
Cinzas, A^t	4,40%
Humidade, W^t	12,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,40
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	4,333 Nm^3/kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0_{N_2}$	3,437 Nm^3/kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,902 Nm^3/kg
Volume dos gases triatômicos, V_{RO_2}	0,794 Nm^3/kg
Volume real dos gases biatômicos, V_{N_2}	4,806 Nm^3/kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	0,930 Nm^3/kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,364 Nm^3/kg
Volume dos gases secos	5,964 Nm^3/kg
Volume total dos gases de combustão	6,894 Nm^3/kg

Problema 3.4

Os valores de carbono, hidrogénio, nitrogénio, oxigénio, enxofre e cinzas correspondem à **massa seca**. A humidade de 8% será incorporada para obter a massa de trabalho.

Problema 3.4 — Dados

Componente	Massa seca
------------	------------

Carbono, C ^s	55%
-------------------------	-----

Hidrogénio, H ^s	6%
----------------------------	----

Nitrogénio, N ^s	2%
----------------------------	----

Oxigénio, O ^s	24%
--------------------------	-----

Enxofre, S ^s	3%
-------------------------	----

Cinzas, A ^s	10%
------------------------	-----

Humidade, W ^t	8%
--------------------------	----

Excesso de ar, EA	30%
-------------------	-----

O coeficiente de excesso de ar é:

$$\alpha = 1 + EA/100$$

$$\alpha = 1 + 30/100$$

$$\alpha = 1,30$$

1. Massa de trabalho do combustível

A conversão da massa seca para massa de trabalho é feita por:

$$X^t = X^s \times (100 - W^t)/100$$

Como:

$$W^t = 8\%$$

tem-se:

$$X^t = X^s \times 0,92$$

Carbono

$$C^t = 55 \times 0,92$$

$$C^t = 50,60\%$$

Hidrogénio

$$H^t = 6 \times 0,92$$

$$H^t = 5,52\%$$

Nitrogénio

$$N^t = 2 \times 0,92$$

$$N^t = 1,84\%$$

Oxigénio

$$O^t = 24 \times 0,92$$

$$O^t = 22,08\%$$

Enxofre

$$S^t = 3 \times 0,92$$

$$S^t = 2,76\%$$

Cinzas

$$A^t = 10 \times 0,92$$

$$A^t = 9,20\%$$

A humidade é:

$$W^t = 8,00\%$$

Verificação

$$50,60 + 5,52 + 1,84 + 22,08 + 2,76 + 9,20 + 8,00 = 100\%$$

A composição em massa de trabalho é:

Componente	Massa de trabalho
C ^t	50,60%
H ^t	5,52%
N ^t	1,84%
O ^t	22,08%

Componente	Massa de trabalho
S ^t	2,76%
A ^t	9,20%
W ^t	8,00%
Total	100,00%

2. Volume teórico do ar

Para combustíveis sólidos ou líquidos:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t$$

Substituindo:

$$\begin{aligned}
 V^0_{\text{ar}} &= 0,0889(50,60 + 0,375 \times 2,76) \\
 &\quad + 0,265 \times 5,52 \\
 &\quad - 0,0333 \times 22,08
 \end{aligned}$$

Calculando a contribuição do enxofre:

$$0,375 \times 2,76 = 1,035$$

$$50,60 + 1,035 = 51,635$$

Assim:

$$V^0_{\text{ar}} = 0,0889 \times 51,635 + 0,265 \times 5,52 - 0,0333 \times 22,08$$

$$V^0_{\text{ar}} = 4,590 + 1,463 - 0,735$$

$$\mathbf{V^0_{ar} = 5,318 \text{ Nm}^3 \text{ de ar/kg de combustível}}$$

3. Volume teórico dos gases biatômicos

O volume teórico dos gases biatômicos calcula-se por:

$$V^0_{N_2} = 0,79V^0_{\text{ar}} + 0,008N^t$$

Substituindo:

$$V^0_{N_2} = 0,79 \times 5,318 + 0,008 \times 1,84$$

$$V^0_{N_2} = 4,201 + 0,015$$

$$\mathbf{V^0_{N_2} = 4,216 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

4. Volume teórico de vapor de água

O volume teórico de vapor de água é:

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,111\text{H}^t + 0,0124\text{W}^t + 0,0161\text{V}^0\text{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V^0\text{H}_2\text{O} &= 0,111 \times 5,52 \\ &\quad + 0,0124 \times 8 \\ &\quad + 0,0161 \times 5,318 \end{aligned}$$

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,613 + 0,099 + 0,086$$

$$V^0\text{H}_2\text{O} = 0,798 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

5. Volume teórico dos gases triatômicos

O volume teórico dos gases triatômicos é:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(\text{C}^t + 0,375\text{S}^t)$$

Substituindo:

$$\text{VRO}_2 = 0,01866(50,60 + 0,375 \times 2,76)$$

$$\text{VRO}_2 = 0,01866 \times 51,635$$

$$\text{VRO}_2 = 0,964 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}$$

Este volume representa:

$$\text{VRO}_2 = \text{VCO}_2 + \text{VSO}_2$$

Resultados teóricos do Problema 3.4

Grandeza	Resultado
Coeficiente de excesso de ar, α	1,30
Volume teórico do ar, $V^0\text{ar}$	5,318 Nm^3/kg
Volume teórico dos gases biatômicos, $V^0\text{N}_2$	4,216 Nm^3/kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0\text{H}_2\text{O}$	0,798 Nm^3/kg

Grandeza	Resultado
Volume teórico dos gases triatómicos, VRO_2	0,964 Nm^3/kg

Na continuação calculam-se os volumes reais para os **30% de excesso de ar**.

$$\alpha = 1,30$$

$$V^0_{ar} = 5,318 \text{ Nm}^3/kg$$

$$V^0_{N_2} = 4,216 \text{ Nm}^3/kg$$

$$V^0_{H_2O} = 0,798 \text{ Nm}^3/kg$$

$$VRO_2 = 0,964 \text{ Nm}^3/kg$$

6. Volume real dos gases biatómicos

O volume real dos gases biatómicos calcula-se por:

$$VN_2 = V^0_{N_2} + 0,79(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Como:

$$\alpha - 1 = 1,30 - 1 = 0,30$$

Substituindo:

$$VN_2 = 4,216 + 0,79 \times 0,30 \times 5,318$$

$$VN_2 = 4,216 + 1,260$$

$$\mathbf{VN_2 = 5,476 \text{ Nm}^3/kg \text{ de combustível}}$$

Também pode ser calculado directamente:

$$VN_2 = 0,79\alpha V^0_{ar} + 0,008N^t$$

$$VN_2 = 0,79 \times 1,30 \times 5,318 + 0,008 \times 1,84$$

$$VN_2 = 5,461 + 0,015$$

$$\mathbf{VN_2 = 5,476 \text{ Nm}^3/kg \text{ de combustível}}$$

7. Volume real de vapor de água

O volume real de vapor de água calcula-se por:

$$VH_2O = V^0_{H_2O} + 0,0161(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$VH_2O = 0,798 + 0,0161 \times 0,30 \times 5,318$$

$$V_{H_2O} = 0,798 + 0,026$$

$$\mathbf{V_{H_2O} = 0,824 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Também se pode usar:

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124W^t + 0,0161\alpha V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,111 \times 5,52 \\ &\quad + 0,0124 \times 8 \\ &\quad + 0,0161 \times 1,30 \times 5,318 \end{aligned}$$

$$V_{H_2O} = 0,613 + 0,099 + 0,111$$

$$\mathbf{V_{H_2O} = 0,824 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

A pequena diferença na soma decorre do arredondamento dos valores intermédios.

8. Volume real dos gases triatômicos

Na combustão completa, o excesso de ar não altera a quantidade de carbono e de enxofre queimados. Portanto:

$$V_{RO_2} = V^0_{RO_2}$$

$$\mathbf{V_{RO_2} = 0,964 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Este volume é composto por:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$$

Volume de dióxido de carbono

$$V_{CO_2} = 0,01866C^t$$

$$V_{CO_2} = 0,01866 \times 50,60$$

$$\mathbf{V_{CO_2} = 0,944 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

Volume de dióxido de enxofre

$$V_{SO_2} = 0,00699S^t$$

$$V_{SO_2} = 0,00699 \times 2,76$$

$$\mathbf{V_{SO_2} = 0,019 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

Verificação:

$$VRO_2 = 0,944 + 0,019$$

$$VRO_2 = 0,963 \approx \mathbf{0,964 \text{ Nm}^3/\text{kg}}$$

9. Volume do oxigénio excedente

O volume de oxigénio excedente é dado por:

$$VO_2 = 0,21(\alpha - 1)V^0_{ar}$$

Substituindo:

$$VO_2 = 0,21 \times 0,30 \times 5,318$$

$$VO_2 = 0,335$$

$$\mathbf{VO_2 = 0,335 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

10. Volume total dos gases de combustão

O volume total húmido dos gases de combustão é:

$$Vg = VRO_2 + VN_2 + VH_2O + VO_2$$

Substituindo:

$$Vg = 0,964 + 5,476 + 0,824 + 0,335$$

$$\mathbf{Vg = 7,599 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Volume dos gases secos

Excluindo o vapor de água:

$$Vg,s = VRO_2 + VN_2 + VO_2$$

$$Vg,s = 0,964 + 5,476 + 0,335$$

$$\mathbf{Vg,s = 6,775 \text{ Nm}^3/\text{kg de combustível}}$$

Resultados finais do Problema 3.4

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	50,60%

Grandeza	Resultado
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	5,52%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	1,84%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	22,08%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	2,76%
Cinzas, A^t	9,20%
Humidade, W^t	8,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,30
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	5,318 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatómicos, $V^0_{N_2}$	4,216 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,798 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatómicos, VRO_2	0,964 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatómicos, VN_2	5,476 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, VH_2O	0,824 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, VO_2	0,335 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	6,775 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	7,599 Nm³/kg