

Universidad Nacional Autónoma de México
 Facultad de Química
 Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Introducción de la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales

Profesor: Luis Enrique Jardón Pérez

Ejemplo de balance de carga para aleaciones base Aluminio

Se desea producir en un horno de reverbero 250 kg de aleación 240.0 de aluminio por hora. Si el horno se carga con 15 % de retornos y un 12 % de recortes empaquetados de aleación 2219 (considerando que nos llega periódicamente esta materia prima de una planta de conformado).

En el patio de chatarras tiene las siguientes materias primas (ver Tabla 1):

Tabla 1.- Composición química normada de las materias primas para el balance.

Chatarra o aleación liga	Composición (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti
240.0	0.50	0.50	7.0 – 9.0	0.30 – 0.70	5.5 – 6.5	0.30 - 0.70	0.10	---	0.20
2219	0.20	0.30	5.8 – 6.8	0.20 – 0.40	0.02	---	0.10	---	0.10
213.0	1.0 - 3.0	1.2	6.0 - 8.0	0.6	0.10	0.35	2.5	---	0.25
222.0	2	1.5	9.2 - 10.7	0.5	0.15 - 0.35	0.5	0.4	---	0.25
336.0	11.0 - 13.0	0.9	0.50 - 1.5	0.35	0.8 - 1.3	2.0 - 3.0	0.35	---	0.25
A535.0	0.20	0.20	0.10	0.10 - 0.25	6.5 - 7.5	---	---	---	0.25
853.2	5.5 - 6.5	0.50	3.0 - 4.0	0.10	---	---	---	5.5 – 7.0	0.20
100.1	0.15	0.6 - 0.8	0.10	---	---	---	0.05	---	---
Al – 20 Si	20	0.45							
Al – 30 Mn				30					
Al – 20 Mg					20				
Cobre electrolítico			99.99						
Al – Ni						49.5			

Se sabe que históricamente el rendimiento de Al en el horno es del 94 %, use este dato para estimar los rendimientos de los demás elementos de aleación a partir del diagrama de Ellingham. Nota: Considere que las chatarras tienen 0 % de Ti.

Realice el balance de carga para el horno.

Se realiza un tratamiento de refinación de grano al vaciar el metal a una olla para su vaciado en los moldes, para ello se usan barras de aleación Al-10Ti (10 % Ti - Bal. Al). La olla tiene capacidad de 50 kg. Calcule la cantidad de refinador a agregar para obtener un 0.15 % de Ti en la aleación final. Considere que bajo estas condiciones el rendimiento de titanio es del 92 %.

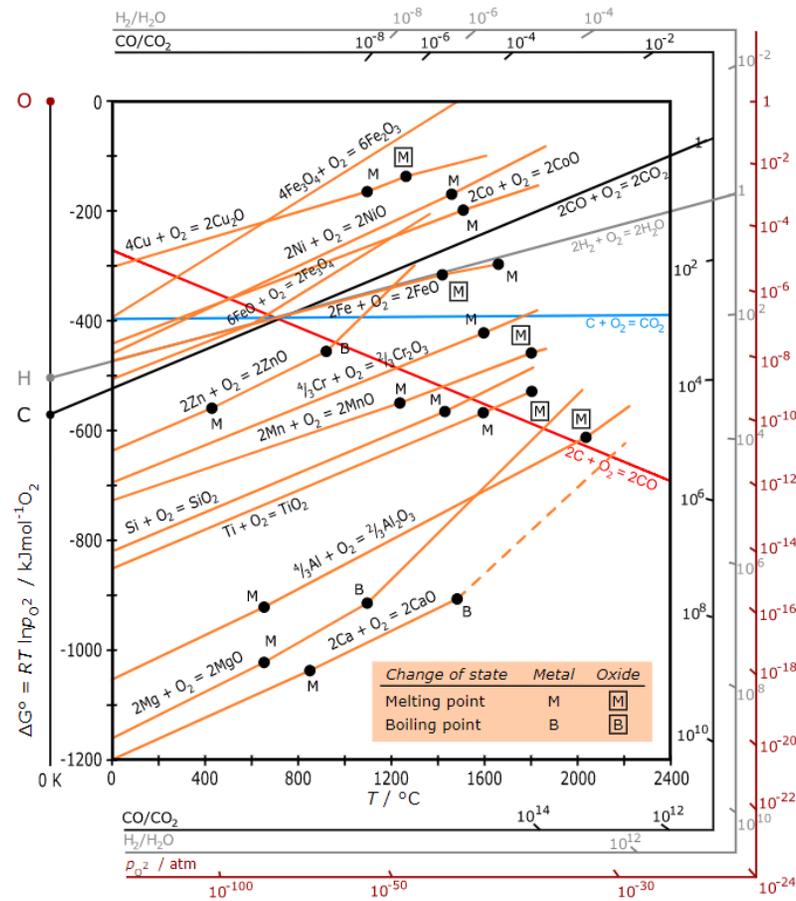


Figura 1.- Diagrama de Ellingham para metales típicos reaccionando con gases.

Solución:

Primeramente, se calcula la composición química de las materias primas (en la realidad se obtienen de un análisis químico) y se estima el rendimiento con base en el diagrama de Ellingham (ver Tabla 2):

Tabla 2.- Composición química de las materias primas y rendimiento estimado.

Chatarra o aleación liga	Composición (%)									Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	
Chatarras y retornos										
240.0	0.125	0.125	8	0.5	5.55	0.5	0.025	0	0	84.725
2219	0.05	0.075	6.3	0.3	0.005	0	0.025	0	0	93.245
213.0	2	0.3	7	0.15	0.025	0.0875	0.625	0	0	89.8125
222.0	0.5	0.375	9.95	0.125	0.3	0.125	0.1	0	0	88.575
336.0	12	0.225	1	0.0875	1.05	2.5	0.0875	0	0	83.05
A535.0	0.05	0.05	0.025	0.175	7	0	0	0	0	92.7
853.2	6	0.125	3.5	0.025	0	0	0	6.25	0	84.1
Aleaciones liga o madre para ajuste de carga										
100.1	0.0375	0.7	0.025	0	0	0	0.0125	0	0	99.225
Al – 20 Si	20	0.1125	0	0	0	0	0	0	0	79.8875
Al – 30 Mn	0	0	0	30	0	0	0	0	0	70
Al – 20 Mg	0	0	0	0	20	0	0	0	0	80
Cobre electrolítico	0	0	99.99	0	0	0	0	0	0	0.01
Al – Ni	0	0	0	0	0	49.5	0	0	0	50.5
Rendimientos										
Rendimiento	96	100	100	97	93	100	99	99	92	94

Se calcula la masa requerida de cada elemento de la aleación:

$$m_{req,i} = \frac{m_{total} \left(\frac{\% i}{100 \%} \right)}{\left(\frac{\eta_i}{100} \right)}$$

La masa requerida de los elementos de aleación se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3.- Masa requerida de los elementos de aleación.

Masa requerida	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
kg	0.33	0.31	20.00	1.29	14.92	1.25	0.06	0.00	0.00	226.53

Calculamos el aporte de cada elemento de aleación por los retornos y las chatarras prefijadas:

$$m_{Retornos} = m_{total} \frac{\% Retornos}{100}$$

$$m_{Retornos} = 37.5 \text{ kg}$$

$$m_{i,Retornos} = m_{Retornos} \left(\frac{\% i_{retornos}}{100} \right)$$

$$m_{Ch 2219} = m_{total} \frac{\% Ch 2219}{100}$$

$$m_{Ch 2219} = 30 \text{ kg}$$

$$m_{i,Ch 2219} = m_{Ch 2219} \left(\frac{\% i_{Ch 2219}}{100} \right)$$

La masa de elementos de aleación que aportan las chatarras prefijadas se presenta en la Tabla 4:

Tabla 4.- Masa aportada por los retornos y la chatarra prefijada, en kg.

Masa aportada	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
Retornos	0.047	0.047	3.000	0.188	2.063	0.188	0.009	0.000	0.000	31.959
Ch 2219	0.015	0.023	1.890	0.090	0.002	0.000	0.008	0.000	0.000	27.974

Calculamos la masa que se debe agregar de cada elemento de aleación con las chatarras del balance:

$$m_{Adicional,i} = m_{Requerida,i} - m_{Retornos,i} - m_{Ch\ 2219,i}$$

La Tabla 5 muestra la masa adicional que se requiere para cada elemento de aleación:

Tabla 5.- Masa adicional que se necesita de cada elemento de aleación.

Masa adicional	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
kg	0.264	0.243	15.110	1.011	12.837	1.063	0.046	0.000	0.000	166.615

Seleccionamos nuestro elemento crítico con base en la composición química de las chatarras y los elementos de aleación que requiere el aluminio 240.0.

Para la selección del elemento crítico, se deben considerar varias cuestiones:

- El primer criterio es que debe ser un elemento de aleación (que tenga un rango de composición)
- Debe presentarse en las chatarras con las que contamos (una debe tenerlo con una composición mayor a la requerida y otra debe de tenerlo con una composición menor a la requerida)
- Vamos a preferir los elementos de aleación con mayor costo o cuya ferroaleación sea más escasa o costosa.

En este caso tanto el Cu como el Mg podrían ser el elemento crítico dadas las composiciones de las chatarras con las que contamos.

Elemento crítico: Mg

Para la selección de las chatarras, debemos considerar que no posea en su composición un elemento de aleación indeseado en una cantidad muy elevada.

Aleaciones para el balance: A535.0 y 222.0

Las ecuaciones del balance de carga son:

$$m_{total} = m_{Retornos} + m_{Ch\ 2219} + m_{Ch\ 222.0} + m_{Ch\ A535.0}$$

$$250\ kg = 37.5 + 30.0 + m_{Ch\ 222.0} + m_{Ch\ A535.0}$$

$$m_{Ch\ 222.0} + m_{Ch\ A535.0} = 250\ kg - 37.5\ kg - 30.0\ kg$$

$$m_{Ch\ 222.0} + m_{Ch\ A535.0} = 182.5\ kg$$

La segunda ecuación es el balance de masa de elemento crítico que se va a cargar al horno, en este caso Mg:

$$m_{Mg,total} = m_{Mg,Retornos} + m_{Mg,Ch\ 2219} + m_{Mg,Ch\ 222.0} + m_{Mg,Ch\ A535.0}$$

$$14.92\ kg = 2.25\ kg + 0.0015\ kg + m_{Mg,Ch\ 222.0} + m_{Mg,Ch\ A535.0}$$

$$m_{Mg,Ch\ 222.0} + m_{Mg,Ch\ A535.0} = 14.92\ kg - 2.25\ kg - 0.0015\ kg$$

$$m_{Mg,Ch\ 222.0} + m_{Mg,Ch\ A535.0} = 12.837\ kg$$

$$\left(\frac{\% Mg_{Ch\ 222.0}}{100}\right) m_{Ch\ 222.0} + \left(\frac{\% Mg_{Ch\ A535.0}}{100}\right) m_{Ch\ A535.0} = 12.837\ kg$$

$$(0.003)m_{Ch\ 222.0} + (0.075)m_{Ch\ A535.0} = 12.837\text{ kg}$$

Con lo cual llegamos a tener dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$m_{Ch\ 222.0} + m_{Ch\ A535.0} = 182.5\text{ kg}$$

$$(0.003)m_{Ch\ 222.0} + (0.075)m_{Ch\ A535.0} = 12.837\text{ kg}$$

Y resolvemos el sistema de ecuaciones obtenido:

$$m_{Ch\ A535.0} = 182.5\text{ kg} - m_{Ch\ 222.0}$$

$$(0.003)m_{Ch\ 222.0} + (0.075)(182.5\text{ kg} - m_{Ch\ 222.0}) = 12.837\text{ kg}$$

$$m_{Ch\ 222.0}(0.003 - 0.075) + 0.075 * 182.5\text{kg} = 12.837\text{ kg}$$

$$m_{Ch\ 222.0}(0.003 - 0.075) + 13.6875\text{kg} = 12.837\text{ kg}$$

$$-0.072m_{Ch\ 222.0} = 12.837\text{ kg} - 13.6875\text{kg}$$

$$-0.072m_{Ch\ 222.0} = -0.8505\text{ kg}$$

$$m_{Ch\ 222.0} = \frac{-0.8505\text{ kg}}{-0.072}$$

$$m_{Ch\ 222.0} = 11.813\text{ kg}$$

$$m_{Ch\ A535.0} = 182.5\text{ kg} - 11.813\text{ kg}$$

$$m_{Ch\ A535.0} = 170.682\text{ kg}$$

Ahora calculamos una primera composición estimada con los elementos de aleación que aportan los retornos, la chatarra prefijada y las chatarras que elegimos para el balance (ver Tabla 6):

$$m_{i,Ch X} = m_{Ch X} \left(\frac{\%i_{Ch X}}{100} \right)$$

Tabla 6.- Masa de cada elemento aportado (en kg) por las chatarras y retornos.

Masa aportada	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
Retornos	0.047	0.047	3.000	0.188	2.081	0.188	0.009	0.000	0.000	31.941
Ch 2219	0.015	0.023	1.890	0.090	0.002	0.000	0.008	0.000	0.000	27.974
Ch 222.0	0.059	0.044	1.176	0.015	0.035	0.015	0.012	0.000	0.000	10.462
Ch A535.0	0.085	0.085	0.043	0.299	12.801	0.000	0.000	0.000	0.000	157.369

A partir de esas masas de cada elemento aportado por las chatarras, calculamos el Total Aportado y lo comparamos con la cantidad requerida que calculamos:

$$m_{Total Aportada i} = \sum m_{i,Ch X}$$

$$m_{Balance i} = m_{Total Aportada i} - m_{Requerida}$$

Los elementos que están por debajo del requerido, pero que no son deseados en la aleación, no representan un problema, ya que su límite máximo va a seguir por debajo del deseado. Por ejemplo, en la Tabla 7, se puede observar que el Mg cumple el balance ya que es nuestro elemento crítico, sien embargo el Cu, el Mn y el Ni deben ajustarse para satisfacer los requerimientos del cliente o norma. Por otro lado, observamos que el Si, el Fe y el Zn se encuentran por debajo del limite máximo, pero no se ajustan al ser elementos que no aportan a las propiedades de la aleación.

Tabla 7.- Resultados del balance de carga previos al ajuste de los elementos de aleación.

Masa aportada	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
Retornos	0.047	0.047	3.000	0.188	2.081	0.188	0.009	0.000	0.000	31.941
Ch 2219	0.015	0.023	1.890	0.090	0.002	0.000	0.008	0.000	0.000	27.974
Ch 222.0	0.059	0.044	1.176	0.015	0.035	0.015	0.012	0.000	0.000	10.462
Ch A535.0	0.085	0.085	0.043	0.299	12.801	0.000	0.000	0.000	0.000	157.369
Total Aportado	0.206	0.199	6.109	0.591	14.919	0.202	0.029	0.000	0.000	227.745
Requerido	0.326	0.313	20.000	1.289	14.919	1.250	0.063	0.000	0.000	226.529
Balance	0.119	0.113	13.891	0.698	0.000	1.048	0.034	0.000	0.000	-1.216

Por otra parte, los elementos de aleación que requerimos en la composición química, deben de ajustarse con las aleaciones liga:

Cu:

Recordemos que la fuente de Cu para el ajuste es el Cu electrolítico, por lo que:

$$m_{Cu, Cu \text{ electrolitico}} = m_{Cu \text{ Ajuste}}$$

$$m_{Cu \text{ electrolitico}} \left(\frac{\% Cu_{Cu \text{ electrolitico}}}{100} \right) = m_{Cu \text{ Requerida}} - m_{Cu \text{ Adicionada}}$$

Llegando a:

$$m_{Cu \text{ electrolitico}} = \frac{m_{Cu \text{ Ajuste}}}{\left(\frac{\% Cu_{Cu \text{ electrolitico}}}{100 \%} \right)}$$

$$m_{Cu \text{ electrolitico}} = 13.7426 \text{ kg}$$

Mn:

$$m_{Al-30Mn} = \frac{m_{Mn \text{ ajuste}}}{\left(\frac{\% Mn_{Al-30Mn}}{100 \%} \right)}$$

$$m_{Al-30Mn} = 2.3282 \text{ kg}$$

Ni:

$$m_{Al-Ni} = \frac{m_{Ni \text{ ajuste}}}{\left(\frac{\% Ni_{Al-Ni}}{100 \%} \right)}$$

$$m_{Al-Ni} = 2.113 \text{ kg}$$

Nota: el aluminio esta en mayor cantidad del requerido, pero es un porcentaje muy pequeño en comparación a la masa requerida, y al ser la base de la aleación, no la vamos a ajustar de momento.

Finalmente vamos a calcular el aporte de todas las aleaciones que vamos a usar como carga para el horno y a calcular un estimado de la composición química que vamos a obtener. Podemos estimar una composición química con el total de la masa adicionada:

$$\%i = \left(\frac{m_{i,Adicionada} \left(\frac{\eta_i}{100} \right)}{m_{Total}} \right) * 100 \%$$

Esto para considerar las pérdidas de los elementos por el rendimiento de cada uno.

Para comparar con la composición que se nos pide de manera nominal. Los resultados finales del balance se presentan en la Tabla 8:

Tabla 8.- Resultados del balance de carga de la aleación 240.0.

Masa aportada (kg)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti
Retornos	0.047	0.047	3.000	0.188	2.081	0.188	0.009	0.000	0.000
Ch 2219	0.015	0.023	1.890	0.090	0.002	0.000	0.008	0.000	0.000
Ch 222.0	0.059	0.044	1.176	0.015	0.035	0.015	0.012	0.000	0.000
Ch A535.0	0.085	0.085	0.043	0.299	12.801	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobre electrolítico	0.000	0.000	13.891	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al - 30 Mn	0.000	0.000	0.000	0.698	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al - Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.048	0.000	0.000	0.000
Total Aportado	0.206	0.199	20.000	1.289	14.919	1.250	0.029	0.000	0.000
Requerido	0.326	0.313	20.000	1.289	14.919	1.250	0.063	0.000	0.000
Balance	0.119	0.113	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000
C. Q. Estimada	0.079	0.080	8.000	0.500	5.550	0.500	0.011	0.000	0.000
C. Q. 240.0	0.5	0.5	7.0 – 9.0	0.30 – 0.70	5.5 – 6.5	0.30 - 0.70	0.1	---	0.2

Para calcular la cantidad de refinador usamos la siguiente expresión:

$$m_{Al-10Ti} = \frac{m_{Olla} \left(\frac{\% Ti_{Refinador}}{100} \right)}{\left(\frac{\% Ti_{Al-10Ti}}{100} \right) \left(\frac{\eta_{Ti}}{100} \right)}$$

$$m_{Al-10Ti} = \frac{50kg \left(\frac{0.15}{100} \right)}{\left(\frac{10}{100} \right) \left(\frac{92}{100} \right)}$$

$$m_{Al-10Ti} = 0.8152 \text{ kg}$$