



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

Simulación de la metalurgia secundaria

Autor: Adrián García Suárez

Tutor: Francisco Blanco Álvarez

Oviedo, Junio de 2017



Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETO Y ALCANCE	5
3	VENTAJAS DE LA METALURGIA SECUNDARIA RESPECTO A LA ACERÍA ANTIGUA	6
4	OBJETIVOS DE LA METALURGIA SECUNDARIA	8
5	PRINCIPALES REACCIONES, FENOMENOS Y PROCESOS EN LA METALURGIA SECUNDARIA	12
5.1	Desoxidación del acero líquido	12
5.2	Desgasificación y descarburación del acero líquido	17
5.3	Desulfuración del acero líquido	23
6	PROCESOS Y EQUIPOS DE METALURGIA SECUNDARIA	38
6.1	Agitación y homogeneización	39
6.2	Principales procesos de tratamiento de metalurgia secundaria	43
6.1.1	Tratamiento por vacío	44
6.1.1.1	Tratamiento por vacío sin aporte térmico	45
6.1.1.2	Tratamiento por vacío con aporte térmico.....	49
6.1.2	Tratamiento a presión atmosférica	55
6.1.2.1	Tratamiento a presión atmosférica sin aporte térmico	56
6.1.2.2	Tratamiento a presión atmosférica con aporte térmico.....	60
7	RIESGOS ASOCIADOS A LA METALURGIA SECUNDARIA	66
8	SIMULACIÓN DE METALURGIA SECUNDARIA	68
7.1	Objetivo	69
7.2	Procesos y parámetros de la simulación	69
7.2.1	Cálculo de adiciones de aleantes.....	69
7.2.2	Desoxidación y cálculo de adiciones de aluminio.....	70
7.2.3	Descarburación.....	71
7.2.4	Desulfuración.....	73
7.2.5	Eliminación de hidrogeno	76



7.2.6	Agitación en la cuchara.....	77
7.2.7	Recalentamiento eléctrico.....	78
7.2.8	Limpieza del acero.....	81
7.3	Definición de los grados de acero requeridos	83
7.3.1	Acero para vigas de construcción de aplicación general.....	84
7.3.2	Acero de ultra bajo carbono (ULC) con TiNb para chapas de la industria automotriz	86
7.3.3	Acero para tubería de distribución de gas.....	87
7.3.4	Acero para construcción mecánica.....	88
7.4	Descripción de la planta de simulación.....	89
7.5	Planificación de la secuencia	91
7.6	Simulación de los diferentes grados de acero	96
7.6.1	Simulación del acero para vigas de construcción general.....	96
7.6.2	Simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb.....	104
7.6.3	Simulación del acero para tuberías de distribución de gas	116
7.6.4	Simulación del acero para construcción mecánica.....	126
8.	CONCLUSIONES.....	137
9.	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	140
10.	BIBLIOGRAFÍA	141

Índice de ilustraciones

<i>Figura 1. Esquema de un Horno Siemens-Martin</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Esquema comparativo entre procesos de nueva y antigua acería</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Representación simple del ajuste de composición</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4. Ilustración simple del proceso de desgasificación</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Representación simplificada del proceso de desulfuración</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Representación del ajuste de temperatura por arco eléctrico con electrodos</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Imagen de inclusiones en el acero</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8. Expresiones del producto de solubilidad en el hierro líquido de algunos óxidos y sulfuros</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Relación entre [O] y [Al] para tres temperaturas diferentes</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10. Efecto de la temperatura en las solubilidades del nitrógeno e hidrógeno en el hierro a 1 atm de presión</i>	<i>18</i>



<i>Figura 11. Relaciones de equilibrio para las reacciones de desgasificación</i>	20
<i>Figura 12. Esquema simplificado de un horno cuchara</i>	24
<i>Figura 13. Capacidades de sulfuro de algunas escorias a 1873°K</i>	26
<i>Figura 14. Relación de equilibrio del azufre entre el hierro líquido con aluminio disuelto y escorias CaO-Al₂O₃</i>	27
<i>Figura 15. Diagrama de actividad frente a composición para el sistema CaO- Al₂O₃ a 1773 y 1873°K</i>	29
<i>Figura 16. Diagrama de actividad frente a la composición del sistema CaO - SiO₂ a 1873°K</i>	29
<i>Figura 17. Capacidades de sulfuro y líquido saturado CaO (línea discontinua) para el sistema CaF₂ - CaO - Al₂O₃ a 1773°K</i>	30
<i>Figura 18. Diagrama ternario Cao-SiO2-Al2O3 donde se representan las variaciones del coeficiente de reparto en función de la composición de la escoria y una fase metálica</i>	34
<i>Figura 19. Desulfuración provocada por el contacto entre partículas de escoria fundida y masa fundida (contacto transitorio)</i>	37
<i>Figure 20. Desulfuración provocada por el contacto entre escoria superior y metal fundido (contacto permanente)</i>	37
<i>Figura 21. Esquema de la inyección de Argón mediante lanza</i>	41
<i>Figura 22. Esquema de la inyección de Argón a través de tapón poroso</i>	42
<i>Figura 23. Esquema del proceso Vacuum Degassing o tanque desgasificador</i>	46
<i>Figura 24. Esquema del proceso de desgasificación en chorro, de cuchara a lingotera</i>	47
<i>Figura 25. Esquema del proceso de elevación intermitente (DH)</i>	48
<i>Figura 26. Esquema del proceso de desgasificación por recirculación (RH)</i>	49
<i>Figura 27. Fases del proceso ASEA-SKF</i>	50
<i>Figura 28. Esquema del proceso Vacuum Arc Degassing</i>	53
<i>Figura 29. Esquema del proceso Vacuum Oxygen Decarburisation</i>	54
<i>Figura 30. Esquema del proceso CAS-OB</i>	58
<i>Figura 31. Esquema del proceso de inyección con alambre</i>	59
<i>Figura 32. Esquema del proceso de inyección de aditivos en polvo mediante lanza</i>	60
<i>Figura 33. Esquema del horno cuchara</i>	63
<i>Figura 34. Esquema del convertidor AOD</i>	66
<i>Figura 35. Pantalla de control de la estación de lavado con argón en el simulador</i>	78
<i>Figure 36. Pantalla de control del horno cuchara del simulador</i>	81
<i>Figura 37. Comparación de la composición de cada elemento entre los cuatro grados de acero objeto de simulación</i>	84
<i>Figura 38. Microestructura acero hipoeutectoide 0,15%C. Aumento de 200x</i>	85
<i>Figura 39. Planta de simulación de metalurgia secundaria</i>	91



<i>Figura 40. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero para vigas de construcción general</i>	<i>97</i>
<i>Figura 41. Colada del baño de acero desde el convertidor a la cuchara</i>	<i>99</i>
<i>Figura 42. Transporte de la cuchara desde el la estación de lavado por Argón hasta el sistema CAS-OB mediante el puente grúa 1</i>	<i>100</i>
<i>Figura 43. Resumen de resultados para la simulación del grado de acero para vigas de construcción general</i>	<i>102</i>
<i>Figura 44. Composición final tras la simulación del acero para vigas de construcción</i>	<i>102</i>
<i>Figura 45. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>104</i>
<i>Figura 46. Resumen de datos tras la simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>109</i>
<i>Figura 47. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>110</i>
<i>Figura 48. Resumen previo a la segunda simulación para el acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>111</i>
<i>Figura 49. Resumen de datos tras la segunda simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>111</i>
<i>Figura 50. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb tras la segunda simulación</i>	<i>112</i>
<i>Figure 51. Resumen de datos previo a la tercera simulación para el acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>114</i>
<i>Figura 52. Resumen de datos tras la última simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>115</i>
<i>Figure 53. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb en la tercera simulación</i>	<i>115</i>
<i>Figura 54. Resumen de datos previo a la primera simulación del acero para tuberías de distribución de gas</i>	<i>116</i>
<i>Figura 55. Resumen final de datos para el acero para tuberías de distribución de gas tras la primera simulación</i>	<i>120</i>
<i>Figura 56. Composición final después de la primera simulación del grado de acero para tuberías de distribución de gas.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 57. Resumen final de datos para el acero para tuberías de distribución de gas después de la segunda simulación</i>	<i>124</i>
<i>Figura 58. Composición tras la segunda simulación del grado de acero para tuberías de distribución de gas</i>	<i>124</i>
<i>Figura 59. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero para construcción mecánica</i>	<i>126</i>



<i>Figura 60. Resumen de datos final del acero para construcción mecánica después de la primera simulación</i>	<i>130</i>
<i>Figura 61. Composición tras la primera simulación del acero para construcción mecánica</i>	<i>130</i>
<i>Figura 62. Resumen de datos previos a la segunda simulación para el acero de construcción mecánica</i>	<i>132</i>
<i>Figura 63. Resultados finales tras la segunda simulación del grado de acero para construcción mecánica</i>	<i>132</i>
<i>Figura 64. Composición final obtenida tras la segunda simulación del acero para construcción mecánica</i>	<i>133</i>
<i>Figure 65. Resumen inicial de la tercera simulación del acero para construcción mecánica</i>	<i>135</i>
<i>Figure 66. Resumen final tras la tercera simulación del acero para construcción mecánica</i>	<i>136</i>
<i>Figure 67. Composición final del acero líquido después de la última simulación del acero para construcción mecánica</i>	<i>136</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Composición típica de los aceros para vigas de construcción general</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 2. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para vigas de construcción general</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 3. Composición típica de los aceros de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 4. Propiedades mecánicas típicas de los aceros de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5. Composición típica de los aceros para tuberías de distribución de gas</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 6. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para tuberías de distribución de gas</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 7. Composición típica de los aceros para construcción mecánica</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 8. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para construcción mecánica</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 9. Coste y composición de los aditivos del simulador</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 10. Tasas de recuperación promedio para cada aditivo en los diferentes sistemas de tratamiento de la simulación</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 11. Tabla de costes asociados a los aditivos para el grado de acero para vigas de construcción general</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 12. Tabla de costes asociados a los aditivos para el grado de acero de ultra bajo carbono con TiNb</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 13. Costes asociados a los aditivos para el grado de acero para tuberías de distribución de gas</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 14. Costes asociados a los aditivos para el grado de acero para construcción mecánica</i>	<i>134</i>



1 INTRODUCCIÓN

El acero es el metal más usado en la actualidad, y por tanto el de mayor producción mundial, consiste en una aleación de hierro junto con una cantidad variable de carbono entre un 0,05% y un 2% en masa. El acero tiene unas propiedades mecánicas muy buenas y esto permite que su aplicación sea muy amplia, para su fabricación se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento que permiten obtener un acero de alta calidad. La metalurgia secundaria solo es un apartado dentro de la fabricación del acero, y se puede definir como el conjunto de procesos cuyo objetivo es transformar el acero líquido producido en el convertidor o en el horno eléctrico, a partir del arrabio, en un acero líquido calibrado y sin impurezas prácticamente listo para pasar a la etapa de solidificación sin ningún tipo de ajuste térmico. El arrabio es la mezcla de hierro, carbón que no se ha quemado y algunas impurezas que aún no se han podido eliminar. La metalurgia secundaria también es conocida como la metalurgia en cuchara, el resultado final de este conjunto de procesos es un acero que cumple las especificaciones más estrictas. Ahora vamos a hacer una pequeña introducción sobre la génesis de la metalurgia secundaria con una definición final más precisa.

En la segunda mitad del siglo XIX fue cuando se produjo el mayor avance en cuanto a equipos y mecanismos para la fabricación de acero, a principios de este siglo se consiguió una de las mayores optimizaciones en la fabricación del acero, y no fue otra que sustituir el carbón vegetal por coque. Poco después comenzaron a aparecer los convertidores, esto supuso otro gran avance, permitiendo una fabricación masiva de acero a partir del arrabio formado en los hornos altos. Durante esta época también apareció el horno Siemens-Martin (figura 1), este tipo de hornos se utilizaban, como unidad de conversión de arrabio en acero, en serie con el horno alto, pero también permitió reutilizar la chatarra generada en la fabricación masiva de acero.

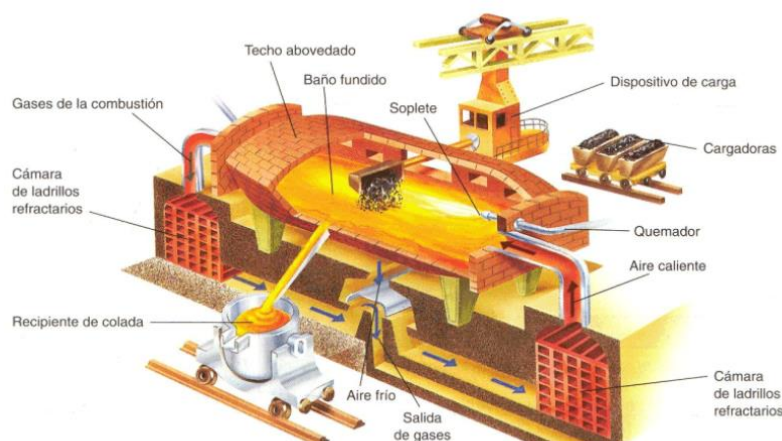


Figura 1. Esquema de un Horno Siemens-Martin

A partir de este momento ya se podía fabricar acero por tres vías diferentes [22]:

- I. Mineral de hierro → Horno alto → Arrabio → Convertidor → Acero líquido
- II. Mineral de hierro → Horno alto → Arrabio → Horno Siemens-Martin → Acero líquido
- III. Chatarra → Horno Siemens-Martin → Acero líquido

Ya en el siglo XX, con el desarrollo de la electricidad industrial se desarrolló el horno eléctrico, de inducción y de arco, estos últimos tenían un coste de producción muy elevado, siendo adecuados solamente para la fabricación de aceros aleados. En los años 50 aparecieron los primeros convertidores de oxígeno o también llamados oxi-convertidores, y de forma simultánea los hornos Siemens-Martin fueron desapareciendo debido a su ineficacia a la hora de competir en términos de productividad con los convertidores y en cuanto a calidad, con los hornos de arco eléctrico, además de los mayores efectos medioambientales negativos que provocaban.

En la segunda mitad del siglo XX, los esfuerzos se centraron en el desarrollo de nuevos equipos y procesos más óptimos de acería eléctrica, consiguiendo unos consumos de energía sumamente bajos por parte del horno de arco, además la



duración de las coladas se consiguió reducir de forma considerable. La secuencia de la colada en el horno de arco es la siguiente:

Adición de chatarra y escorificantes → Fusión → Fase de oxidación → Eliminación de la escoria → Fase de reducción → Ajuste de composición → Basculación del horno a la cuchara → Colada del acero líquido (lingotes, moldes, colada continua)

En el último tercio del siglo aparecieron los transformadores ultra alta potencia (UHP), y es este momento en el cuál, los hornos eléctricos se quedaron obsoletos al igual que le ocurrió tiempo atrás a los oxi-convertidores, Los hornos eléctricos pasaron a usarse únicamente como equipos de fundir y oxidar, y a partir de este momento es cuando se podría decir que surge la denominada “Metalurgia Secundaria”. Llegados a este punto podríamos diferenciar entre procesos de antigua acería y de nueva acería o metalurgia secundaria. Los procesos de antigua acería se basan en el tratamiento del acero obtenido del horno alto en un horno de arco eléctrico o en un convertidor donde se produce la fusión, oxidación y reducción para después bascular el acero en la cuchara para finalmente llevar a cabo la colada. En cambio los procesos de nueva acería están formados por un horno de arco eléctrico UHP donde ocurre la fusión y oxidación, de este horno se obtiene una colada libre de escoria que se bascula en una cuchara y es aquí cuando comienza el tratamiento o procesos de metalurgia secundaria. La principal diferencia entre procesos de nueva y antigua acería de puede ver gráficamente de forma simplificada mediante la figura 2.

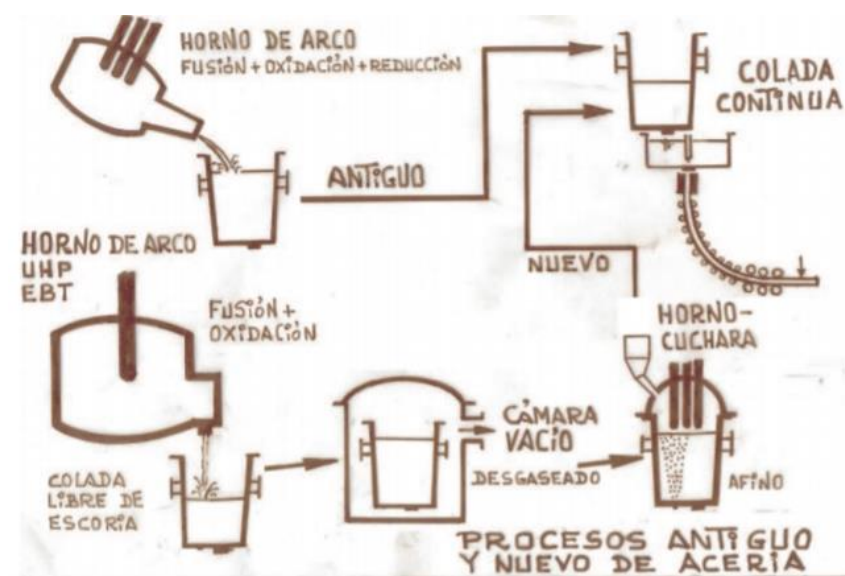


Figura 2. Esquema comparativo entre procesos de nueva y antigua acería

El acero procedente del horno eléctrico UHP es tratado mediante procesos por vacío o a presión atmosférica, ya sea en una cámara de vacío donde se introduce la cuchara o en la propia cuchara como se detallará más adelante. Existen diferentes tipos de tratamiento como veremos cuyo objetivo es degasificar y ajustar en composición y temperatura el acero obtenido del horno UHP para generar la colada del acero ya libre de impurezas y con las especificaciones requeridas. El acero obtenido en el horno eléctrico, e incluso el obtenido en convertidores de oxígeno tiene demasiadas impurezas, y hoy en día las especificaciones de los aceros son muy estrictas en cuanto a los contenidos de elementos como azufre, oxígeno, inclusiones no metálicas, principalmente óxidos, y deben ser eliminados. Para conseguir la eliminación de estas impurezas se utiliza la metalurgia secundaria, obteniendo un acero con unas características muy rigurosas listo para ser solidificado en moldes, lingotes, barras, etc. Es importante añadir que no se debe confundir nueva acería con metalurgia secundaria, la nueva acería engloba el proceso de fabricación de acero de forma más global, la metalurgia secundaria simplemente son los procesos de tratamiento del acero líquido obtenido en el horno eléctrico o el convertidor cuyo objetivo es purificar el acero y mejorar sus propiedades. El acero líquido que llega a los procesos de metalurgia secundaria puede proceder de dos vías



diferentes, la acería eléctrica, es decir, los hornos de arco eléctrico u hornos eléctricos de ultra potencia, y de la acería al oxígeno, o lo que es lo mismo de los convertidores. De forma más rigurosa, la metalurgia secundaria se puede definir como el conjunto de procesos cuyo objetivo es la obtención de un acero libre de impurezas con una composición química correcta, con una temperatura apropiada en función de las especificaciones para ser solidificado y darle la forma adecuada para su futura aplicación. Estos procesos incluyen operaciones de afino como la homogeneización, el ajuste de su composición, de los elementos de aleación, control de la temperatura, desulfuración, desoxidación y descarbonización entre otras más que se detallarán más adelante.

2 OBJETO Y ALCANCE

Los objetivos de aprendizaje previstos son los siguientes:

- Analizar los avances más importantes que ha supuesto el desarrollo de la metalurgia secundaria en la fabricación de acero
- Explicar los objetivos generales de la metalurgia secundaria
- Describir los principales procesos y equipos que hay en la metalurgia secundaria
- Analizar los riesgos más significativos asociados a la metalurgia secundaria y de formas más general al proceso productivo en las acerías
- Realizar una simulación de metalurgia secundaria aplicando los principales principios termodinámicos y cinéticos para la obtención de diferentes grados de acero, intentando reducir el coste de producción de acero líquido al máximo.

El primer paso es analizar los avances y mejoras en el proceso de fabricación del acero que ha supuesto el desarrollo de la metalurgia secundaria en la actualidad,



comparando el rendimiento que ofrecen los procesos que conforman la metalurgia secundaria con respecto a los procesos de acería clásica. Después se describirá más detalladamente los procesos que se llevan a cabo en la metalurgia secundaria y equipos utilizados en esos procesos para obtener un acero con las mejores características posibles en función de los requerimientos precisados. Y antes de pasar a la simulación de metalurgia secundaria se analizarán los principales riesgos de la metalurgia secundaria y las medidas preventivas que se pueden llevar a cabo.

Por último se realizará una simulación de la metalurgia secundaria a través de la plataforma de simulación ofrecida por la página web de la universidad industrial “steeluniversity”. La finalidad de esta simulación será analizar la variación de diversos parámetros en los procesos de la metalurgia secundaria para conseguir un acero con unas determinadas especificaciones a un coste mínimo.

3 VENTAJAS DE LA METALURGIA SECUNDARIA RESPECTO A LA ACERÍA ANTIGUA

La Metalurgia Secundaria ha supuesto un gran avance en la producción de acero, las ventajas que proporcionan este conjunto de procesos son muy variadas. A nivel de costos, algo vital en la industria, la Metalurgia Secundaria permite un gran ahorro energético debido básicamente a un control de temperaturas y aprovechamiento de la energía eléctrica mucho más óptimo, esto contribuye a un mayor rendimiento haciendo que no sea necesaria una inversión tan alta en el control de calidad. Además esta eficiencia superior da lugar a la posibilidad de utilizar ferroaleaciones y otros aditivos más baratos además de conseguir mayores recuperaciones de esas ferroaleaciones y elementos adicionados al baño de acero. Desde el punto de vista productivo la Metalurgia Secundaria también presenta ciertas ventajas con respecto a los procesos de antigua acería,



por ejemplo permite un mejor aprovechamiento de los equipos, optimiza las operaciones de acería, los tiempos de colada se reducen y su trabajo es mucho más sencillo y mecanizado. Además de una mayor eficiencia productiva y económica, la metalurgia secundaria permite fabricar acero con una calidad química y estructural superior. El equipamiento disponible en la Metalurgia Secundaria permite alcanzar contenidos en carbono muy bajos, también hace posible obtener una desgasificación completa o una defosforación muy eficiente, además facilita las operaciones básicas de desoxidación y desulfuración de la fase reductora de la colada. La calidad estructural también se ve afectada de forma positiva por los procesos que conforman la Metalurgia Secundaria, consiguiendo obtener un acero de propiedades mucho mejores. La extracción del oxígeno mediante purga con gases inertes o mediante un baño en vacío impide la formación de inclusiones no metálicas derivadas de los óxidos, y en el caso de que se hubieran formado esas inclusiones no metálicas, mediante dicha purga o el tratamiento por vacío se envían a la escoria para que queden atrapadas y no influyan negativamente en las propiedades y la calidad del acero [22].

La acería clásica en horno eléctrico se ha visto degradada debido a diversas desventajas con respecto a la Metalurgia Secundaria como pueden ser la escasa flexibilidad del proceso, la práctica imposibilidad de hacer vacío, la ausencia de suficiente interfase baño-escoria que provoca reacciones lentas o el bajo rendimiento de las ferroaleaciones. Y respecto a la acería clásica con convertidores de oxígeno, los principales inconvenientes que presenta, al igual que la acería de horno eléctrico, una flexibilidad muy reducida, además de la presencia continua de escoria fosforosa contaminante, inclusiones que disminuyen la calidad del acero, la imposibilidad de reducción en el convertidor y una mayor dificultad en el control de temperaturas y composición.

En conclusión podemos afirmar que el desarrollo de la Metalurgia Secundaria ha supuesto un desarrollo extraordinario en la producción de acero tanto a nivel de



especificaciones cualitativas como respecto al ahorro económico y eficiencia productiva.

4 OBJETIVOS DE LA METALURGIA SECUNDARIA

El acero líquido obtenido en el convertidor o en el horno eléctrico de arco no es un producto final, en la actualidad, las especificaciones del acero son cada vez más exigentes y los clientes de acero exigen unos parámetros de calidad y costes muy rigurosos que el acero obtenido en el horno eléctrico o convertidor no cumple. Algunos de los requerimientos básicos son un menor contenido de impurezas, menos inclusiones no metálicas (aceros más limpios), una cierta calidad y homogeneidad, micro aleaciones para obtener propiedades superiores, etc. Estas son solo algunas de las exigencias por parte de clientes de aceros, y por ello, los principales objetivos de la metalurgia secundaria son los siguientes:

- I. Ajuste de composición, se basa en conseguir ajuste preciso requerido en la composición del acero de los elementos de aleación, carbono, manganeso, titanio, etc. Mediante el ajuste de la composición del acero se modificación de inclusiones presentes en el acero, que no son más que elementos como óxidos y azufre entre otros que perjudican la calidad del acero y sus propiedades. A través del ajuste de composición del acero se controla la morfología de las inclusiones presentes, ya que, como es prácticamente imposible deshacerse de ellas al completo, de esta forma se puede modificar la composición y la forma de las inclusiones no deseables. El objetivo es conseguir un producto final que cumpla los requisitos fijados, con unas determinadas características mecánicas y estructurales. Esto se consigue mediante la adición en la cuchara de elementos como calcio, zirconio, titanio, tierras raras, que modifican dichas inclusiones, y la mezcla y homogeneización óptima del caldo mediante el soplado de gas inerte



mediante un tapón poroso ubicado en el fondo de la cuchara como se puede observar en la figura 3 de forma simplificada.

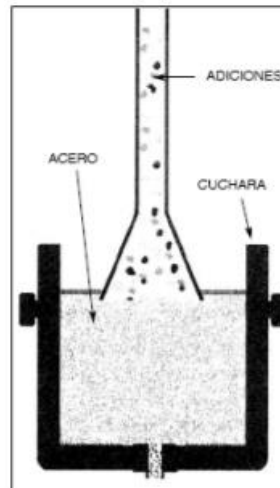


Figura 3. Representación simple del ajuste de composición

- II. Desgasificación o eliminación de gases disueltos en el acero (figura 4), que se basa en la reducción de la concentración de gases letales para la calidad del acero como son el oxígeno, azufre, hidrógeno, nitrógeno y carbono. Estos elementos son conocidos como intersticiales porque ocupan espacios intersticiales en la red cristalina del hierro, para eliminarlos se introduce una campana conectada al vacío dentro de la cuchara y de esta forma se facilita su salida. A la presencia de estas impurezas en el acero se les denomina inclusiones no metálicas, y provocan una reducción de las propiedades estructurales como la ductilidad, resistencia al impacto y la corrosión del acero. El propósito de la desgasificación es la obtención de aceros más limpios, es decir, eliminando las inclusiones no metálicas, principalmente los óxidos, a través de un tratamiento de eliminación al vacío principalmente.

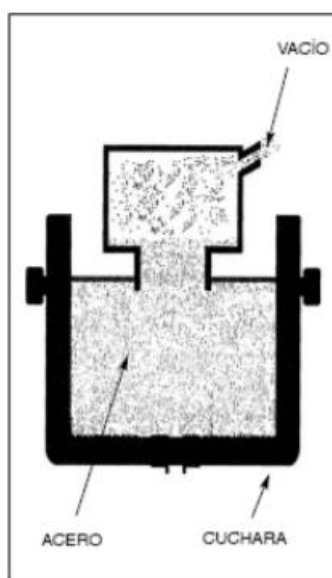


Figura 4. Ilustración simple del proceso de desgasificación

- Desoxidación, la finalidad es eliminar el exceso de oxígeno disuelto en el baño y obtener un acero limpio sin inclusiones de óxidos.
- Desulfuración, el objetivo es alcanzar contenidos en azufre reducidos, inferiores al 0,01% o incluso inferiores al 0,002%, y también una cantidad de fósforo reducida. Se reduce el contenido en azufre mediante la estimulación de reacciones entre metal y escoria y también con la adición forzada de ciertos elementos como el magnesio soplando simultáneamente gas inerte como se puede observar en la figura 5.

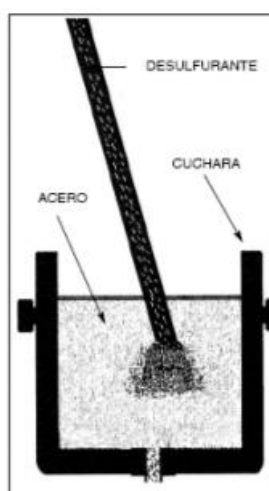


Figura 5. Representación simplificada del proceso de desulfuración



- Eliminación de hidrógeno disuelto en el acero mediante un tratamiento en vacío, la finalidad de esta eliminación de hidrógeno es evitar la formación de grietas en frío.
 - Descarburación, el carbono es un elemento intersticial en la red cristalina del hierro, generalmente no se elimina completamente, forma parte de las especificaciones del acero aunque todo depende de las aplicaciones finales del acero. Para conseguir reducir el contenido de carbono se utiliza una reacción carbono-oxígeno forzada por vacío o gases.
 - Eliminación del nitrógeno presente en el acero
- III. Ajuste de temperatura, se basa en un calibrado óptimo de la temperatura, es decir, garantizar que se consigue la temperatura exigida, que es muy importante a la hora de controlar la estructura de solidificación y las propiedades finales del acero. La temperatura requerida se puede conseguir de varias formas, con un enfriamiento mediante chatarra o borboteo de gas, un calentamiento con caldeo eléctrico que eleva la temperatura debido al calor desprendido por un arco eléctrico, que salta entre unos electrodos a través del baño, como se puede ver de forma esquemática en la figura 6.

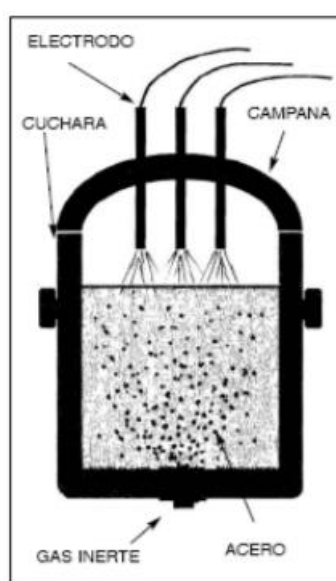


Figura 6. Representación del ajuste de temperatura por arco eléctrico con electrodos



En definitiva, estos son los objetivos generales de la metalurgia secundaria, en la práctica todo depende de las especificaciones requeridas para el acero que se desea obtener, en función de cual sea su futura aplicación algunos objetivos serán más acentuados o trascendentales que otros.

5 PRINCIPALES REACCIONES, FENOMENOS Y PROCESOS EN LA METALURGIA SECUNDARIA

Las impurezas nocivas presentes en el acero son azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, estos elementos ocupan sitios intersticiales en la red cristalina del hierro y debido a esto se conocen como elementos intersticiales. Los principales efectos de estas impurezas en el acero son la pérdida de ductilidad, de resistencia al impacto y de resistencia a la corrosión, cada elemento tiene su propia influencia característica sobre las propiedades del acero. El oxígeno y el azufre también son constituyentes de partículas no metálicas presentes en el acero, conocidas como inclusiones, estas partículas también son perjudiciales para las propiedades del acero y deben ser eliminadas en tanto como sea posible. El carbono también está presente como intersticial en la red de hierro, sin embargo, a diferencia de los otros elementos intersticiales, generalmente no se considera que es una impureza perjudicial y debe estar presente en el acero según la especificación exigida. No obstante, hoy en día, hay grados de acero en los que el carbono también debe ser lo más bajo posible como los aceros de ultra bajo carbono.

5.1 Desoxidación del acero líquido



La eliminación del oxígeno residual es una etapa imprescindible en la producción del acero. El nivel de oxígeno del acero a la salida del convertidor, generalmente varía entre 600 y 1000 ppm, el afino del arrabio en el convertidor, procedente del horno alto, se realiza en condiciones de atmósfera oxidante (inyección de oxígeno), por lo que durante dicho proceso parte del oxígeno se disuelve en el acero. A 1600 ° C la solubilidad del oxígeno en el acero líquido es de 0,23%, que disminuye hasta 0,003% durante la solidificación, por lo que la solubilidad del oxígeno en el acero sólido es insignificamente pequeña.

Por lo tanto, durante la solidificación del acero líquido en lingote o colada continua, el oxígeno en exceso es liberado de la red cristalina del hierro y provoca defectos al reaccionar con el C, Mn, Si, etc., dando como resultado la formación de blowholes (principalmente de CO) e inclusiones no metálicas (FeO-MnO, SiO₂, Al₂O₃, etc.) (Figura 7). La evolución del monóxido de carbono tiene una influencia significativa en la estructura y homogeneidad del metal fundido, los defectos tienen un efecto considerable en las propiedades mecánicas del acero.

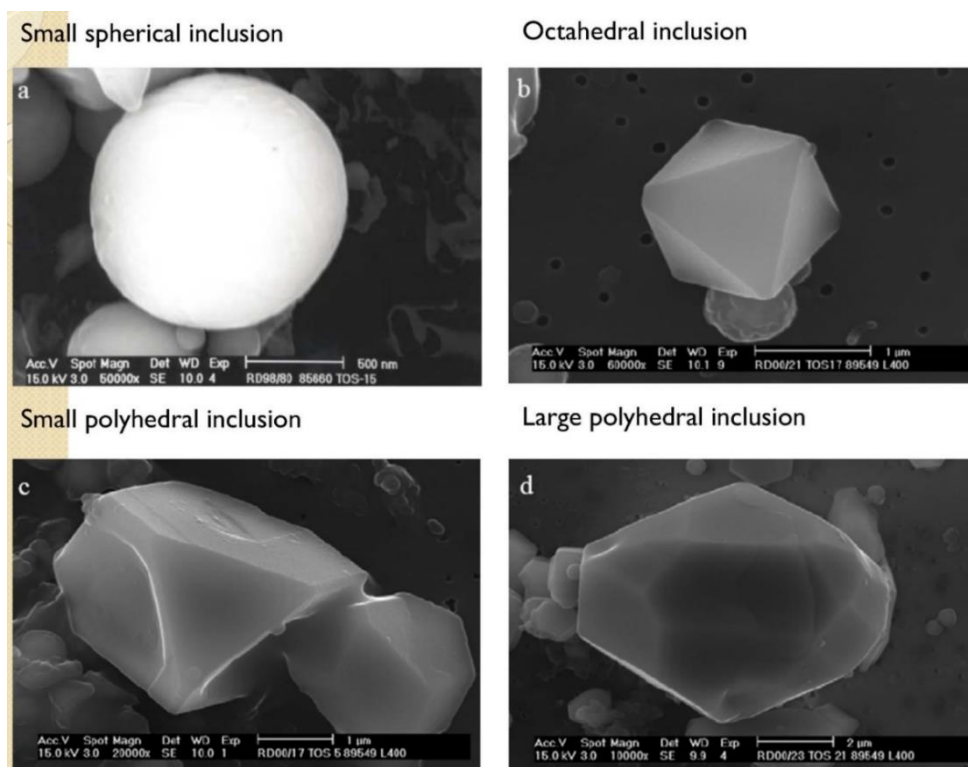


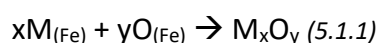
Figura 7. Imagen de inclusiones en el acero



Los niveles de oxígeno disuelto en el acero fundido tienen que ser reducidos mediante la adición en la cuchara o en el horno-cuchara de potentes formadores de óxidos, tales como Mn, Si, Al, Ca, con una elevada afinidad por el oxígeno que, al reaccionar con él, forma inclusiones por precipitación homogénea. Los productos de estas reacciones (Al_2O_3 ,...) permanecen completa o parcialmente en el acero líquido y alguno de los procesos de metalurgia en cuchara ayudan a separar estas inclusiones que serían perjudiciales para los productos de acero de alta calidad. El control de la composición, la forma y distribución de las inclusiones de óxido son muy importantes en este tratamiento.

La adición de aleaciones de calcio a un acero calmado con aluminio convierte las inclusiones de alúmina en inclusiones líquidas de aluminato de calcio a $1600\text{ }^\circ\text{C}$, por lo tanto globulares, cuya flotación es más fácil. Sin embargo, la flotación de las partículas más pequeñas sigue siendo difícil, se consigue mediante una agitación de la cuchara con una intensidad relativamente moderada. Los procesos de desoxidación se acompañan con otros procesos de metalurgia secundaria, como la desulfuración, realizada en los hornos cuchara, juntamente con agitación del líquido mediante un gas inerte, que suele ser argón, y con tratamientos de vacío, de forma que no se obtengan productos de desoxidación.

La reacción elemental de desoxidación del acero se puede escribir como:



Donde M representa al desoxidante (Mn, Si, Al, etc.) y M_xO_y el producto de la desoxidación.

La relación entre la energía libre y la constante de equilibrio de la reacción viene dada por la ecuación de Gibbs–Helmholtz [2]:

$$\Delta G = -\Delta G^0 + RT \ln(K_M) = -\Delta G^0 + RT \ln \left\{ \frac{(a_{\text{M}_x\text{O}_y})}{[h_M]^x [h_O]^y} \right\} = -\Delta G^0 + RT \ln \left\{ \frac{(a_{\text{M}_x\text{O}_y})}{[f_O(\%O_{(\text{Fe})})]^y [f_M(\%M_{(\text{Fe})})]^x} \right\}$$



En el caso del equilibrio termodinámico y suponiendo que el producto de desoxidación es un óxido puro (SiO_2 , Al_2O_3 , etc.), por lo que $a_{\text{MxO}_y} = 1$, la expresión queda:

$$\Delta G^0 = RT \ln \left\{ \frac{1}{[f_O(\%O_{(Fe)})]^y [f_M(\%M_{(Fe)})]^x} \right\} \rightarrow \frac{1}{[f_O(\%O_{(Fe)})]^y [f_M(\%M_{(Fe)})]^x} = \exp\left(\frac{\Delta G^0}{RT}\right)$$

O bien:

$$[f_O(\%O_{(Fe)})]^y [f_M(\%M_{(Fe)})]^x = \frac{1}{K_M} = K_{ps}$$

Y si las soluciones son muy diluidas, f_M y f_O pueden tomarse como 1, resultando:

$$[(\%O_{(Fe)})]^y [(\%M_{(Fe)})]^x = K_{ps}; [W_O]^y [W_M]^x = K_{ps} \quad (5.1.2)$$

Donde K_{ps} se conoce como la constante de la desoxidación. La variación de K_{ps} con temperatura tiene la siguiente forma:

$$\log(K_{ps}) = -\frac{A}{T} + B$$

Siendo A y B constantes

De la expresión de K_{ps} se deduce que al aumentar T aumenta K_{ps} , en otras palabras, la solubilidad de M_xO_y en acero fundido aumenta con la temperatura. Puesto que, en la desoxidación, estamos interesados en reducir la concentración de oxígeno con la adición de una cantidad de desoxidante tan pequeña como sea posible, un aumento de la temperatura afectaría negativamente a la termodinámica del proceso. Usando la ecuación (5.1.2) se puede calcular la variación de W_O con W_M , cuando W_M está en pequeña cantidad. Para valores mayores de W_M , deben tenerse en cuenta los parámetros de interacción.

En la figura 8 se pueden ver las expresiones del producto de solubilidad para algunos óxidos y sulfuros en el hierro líquido.



<i>Compounds (in the solid state)</i>	<i>Log $K_{ps(1\%)}$</i>
Al ₂ O ₃	-62,680 / T + 20.54
MnO	-15,050 / T + 6.70
SiO ₂	-31,040 / T + 12
CaO	-25,655 / T + 7.65
MgO	-26,110 / T + 8.24
CaS	-19,980 / T + 5.90
MgS	-13,615 / T + 6.04

Figura 8. Expresiones del producto de solubilidad en el hierro líquido de algunos óxidos y sulfuros

En el caso particular del aluminio, que es uno de los desoxidantes más fuertes, reacciona exotérmicamente con el oxígeno, siendo la reacción de desoxidación la que se muestra a continuación:



$$K_{\text{Al-O}} = \left\{ \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{[\text{h}_{\text{Al}}]^2 [\text{h}_{\text{O}}]^3} \right\}_{eq} = \left\{ \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{[\% \text{Al}]^2 [\% \text{O}]^3} \right\}_{eq}$$

$$\text{Ln}(K_{\text{Al-O}}) = 47.60 - \frac{149612}{T}$$

Combinando las expresiones anteriores se llega a la siguiente ecuación:



$$[\% O] = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{[h_{Al}]^2 K_{Al-O}}} = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{[\% Al]^2 e^{\left(47.60 - \frac{149612}{T}\right)}}} = \sqrt[3]{\frac{\gamma_{Al_2O_3} X_{Al_2O_3}}{[\% Al]^2 e^{\left(47.60 - \frac{149612}{T}\right)}}} \quad (5.1.3)$$

La relación entre [O] y [Al] se representa, para tres temperaturas diferentes, en la figura 9. A partir de esto, vemos que la desoxidación con aluminio es más eficiente a temperaturas más bajas.

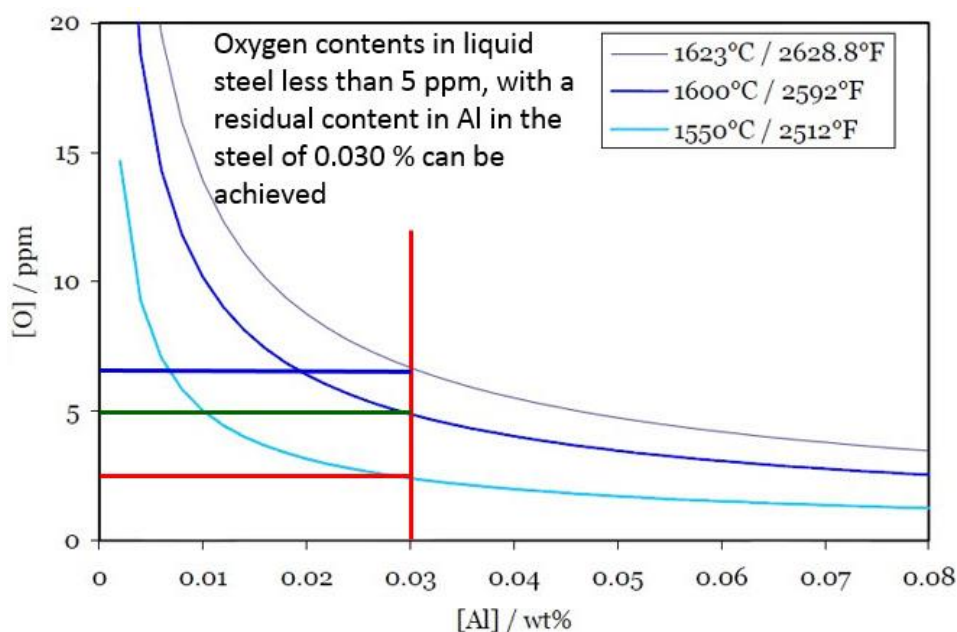


Figura 9. Relación entre [O] y [Al] para tres temperaturas diferentes

La cantidad de aluminio necesario para un determinado nivel final de oxígeno en el acero es la suma del estequiométrico más el correspondiente al equilibrio termodinámico.

5.2 Desgasificación y descarburación del acero líquido

Los gases, es decir el hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, se disuelven en forma de H, N, O atómico, respectivamente, en el acero fundido. Sin embargo, sus



solubilidades en el acero sólido son muy bajas. Las solubilidades del hidrógeno y del nitrógeno en el hierro puro, a una presión de 1 atm, se muestran en la figura 10.

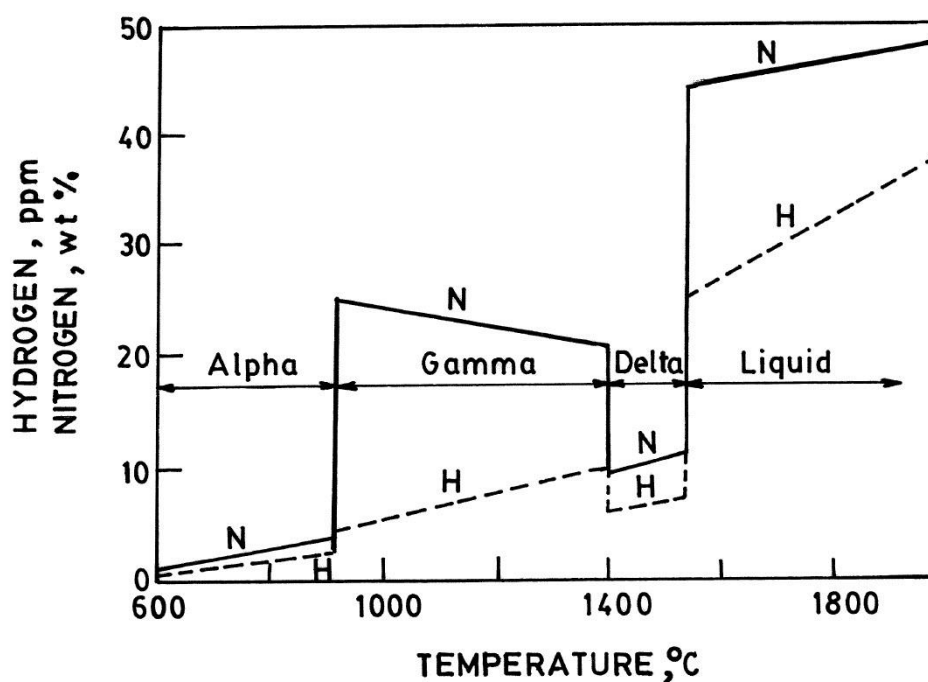


Figura 10. Efecto de la temperatura en las solubilidades del nitrógeno e hidrógeno en el hierro a 1 atm de presión

El hidrógeno es un gas particularmente nocivo, responsable de grietas, porosidad, fragilidad y pérdida de ductilidad en el acero final.

El nitrógeno, si se encuentra en solución sólida en la ferrita, provoca pérdidas de tenacidad en los aceros ferrito-perlíticos, no obstante, si se encuentra combinado con el aluminio, vanadio, titanio o niobio puede colaborar en el endurecimiento estructural del acero debido a la formación de precipitados submicroscópicos de nitruros o carbonitruros metálicos.

El oxígeno, como principal responsable del afinado térmico del hierro, tiene un papel determinante en la composición y propiedades del acero. Por otra parte, al no estar controlada la eliminación de gases disueltos en el hierro líquido por



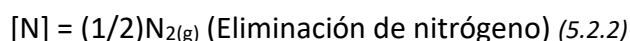
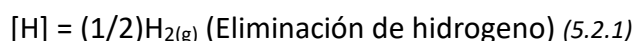
mecanismos puramente físicos (diferencia de solubilidad con la presión y temperatura), existen equilibrios químicos, tales como el correspondiente a la oxidación del carbono en el hierro líquido, en los que el oxígeno disuelto es fundamental. La eliminación del oxígeno del acero se lleva a cabo mediante la adición de desoxidantes, cuando el acero líquido se solidifica, el nitrógeno en exceso forma nitruros estables de Al, Si, Cr, etc. El nitrógeno disuelto afecta la tenacidad y las características de envejecimiento del acero, así como aumenta la tendencia a la fisuración por corrosión por tensión. El nitrógeno es, en general, considerado muy perjudicial para las propiedades del acero, su efecto de endurecimiento por deformación no permite un trabajo en frío extenso sin recocido intermitente y, por lo tanto, un contenido de nitrógeno bajo es esencial para los aceros de embutición profunda. Sin embargo, en algunas aplicaciones, el nitrógeno tiene un efecto beneficioso, tal como el refinamiento del grano por precipitados finos de AlN. Mientras que el nitrógeno es absorbido por el acero fundido durante la fabricación de acero a partir del nitrógeno en el aire, el hidrógeno se recoge de la humedad presente en las cargas sólidas. Los hidruros son termodinámicamente inestables. Por lo tanto, el exceso de hidrógeno en el acero sólido tiende a formar gas H_2 en los poros y también se difunde a la atmósfera, ya que tiene una difusividad muy alta incluso en el acero sólido debido a su baja masa atómica. En secciones relativamente delgadas, como las producidas por laminación, la difusión es bastante rápida, por lo tanto, el exceso de hidrógeno es menor, reduciendo la tendencia hacia el desarrollo de una alta presión de gas y la formación de agujeros.

Sin embargo, en piezas de forja, la difusión no es tan eficiente debido a sus grandes tamaños, así que el hidrógeno rechazado por el acero que solidifica, se acumula en los orificios y agujeros, donde se desarrolla una alta presión de gas. Durante la forja, la combinación de tensiones de trabajo en caliente y alta presión de gas en los orificios cercanos a la superficie, tiende a provocar grietas finas en la región superficial. Los esfuerzos para evitar estas grietas han conducido al desarrollo comercial de procesos de desgasificación al vacío. El hidrógeno



disuelto también provoca una pérdida de ductilidad del acero, por tanto, un bajo contenido de hidrógeno es estrictamente necesario para grados superiores de acero con alta resistencia. Estas consideraciones han llevado a la exigencia de un bajo nivel de hidrógeno en los productos laminados, así como en varios grados de acero.

Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



La figura 11 presenta las relaciones de equilibrio para las reacciones anteriores. La desgasificación es eficaz bajo vacío, una baja presión de gas reduce los valores de h.

SL. No.	Reaction	Equilibrium relation	Unit of h	K vs. T relation	Values of h at 1600°C and 1 mm Hg
1.	$[H] = \frac{1}{2}H_{2(g)}$	$[h_H] = K_H \cdot p_{H_2}^{1/2}$	ppm	$\log K_H = -\frac{1905}{T} + 2.409$	0.77
2.	$[N] = \frac{1}{2}N_{2(g)}$	$[h_N] = K_N \cdot p_{N_2}^{1/2}$	ppm	$\log K_N = -\frac{518}{T} + 2.937$	14.1
3.	$[C] + [O] = CO(g)$	$[h_C][h_O] = K_{CO} \cdot p_{CO}$	wt.pct	$\log K_{CO} = \left(-\frac{1160}{T}\right) - 2.00$	$4.7 \times 10^{-4*}$
			ppm	$\log K_{CO} = \left(-\frac{1160}{T}\right) - 6.00$	0.47*

*At $h_C = 0.05$ wt.%, i.e. 500 ppm. Note: 1 mm Hg = 1 torr = 1.315×10^{-3} atm.

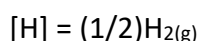
Figura 11. Relaciones de equilibrio para las reacciones de desgasificación

En la figura 11, T es la temperatura absoluta, h indica la actividad del soluto disuelto en el acero fundido y p es la presión parcial del gas en cuestión en la atmósfera. En los sistemas binarios de hierro Fe-H, Fe-N, h_H y h_N pueden tomarse como igual a la concentración de H y N, respectivamente, en partes por millón. Esto se debe a que las concentraciones de hidrogeno y nitrógeno son pequeñas y se encuentran en la región en la que se puede aplicar la ley de Henry, por lo que el coeficiente de actividad (f_i) se puede tomar como 1. Esta aproximación es



bastante válida para aceros ordinarios de bajo contenido de carbono e incluso microaleados, sin embargo, la influencia de los elementos de aleación en los valores de h_H y h_N sería significativa para los aceros de alto contenido de carbono y alta aleación, y las interacciones soluto-soluto deben tenerse en cuenta.

Para la reacción de eliminación de hidrogeno (5.2.1):



Se tiene:

$$K_H = \frac{[h_H]}{p_{H_2}^{1/2}} \rightarrow [h_H] = K_H p_{H_2}^{1/2} \rightarrow \log[h_H] = \log(K_H) + \frac{1}{2} \log(p_{H_2}) \rightarrow \log[h_H] - \frac{1}{2} \log(p_{H_2}) = \log(K_H)$$

$$\log \frac{[ppm H]}{(p_{H_2})^{1/2}} = -\frac{1905}{T} + 2.409 \rightarrow [ppm H] = \sqrt{p_{H_2}} 10^{\left(\frac{1905}{T} + 2.409\right)}$$

Si la temperatura es de $1600^\circ C = 1873 K$ resulta:

$$[ppm H] = 24.6556 \sqrt{p_{H_2}}$$

En la práctica, los desgasificadores modernos pueden alcanzar vacíos de hasta aproximadamente $0,001 \text{ atm.}$, de modo que en condiciones de funcionamiento óptimas, pueden producirse aceros con niveles de hidrógeno por debajo de 1 ppm. Evidentemente, los vacíos ultrabajos descritos anteriormente sólo se alcanzan en la superficie superior del acero cuando se expone al vacío, en la parte inferior de la cuchara, la presión ferrostática es de unas 5 atmósferas, que a partir de la ecuación:

$$[ppm H] = 24.6556 \sqrt{p_{H_2}}$$

Sabemos que es equivalente a un nivel de hidrógeno de equilibrio de 55 ppm a $1600^\circ C$. Por lo tanto, se requiere una elevada velocidad de circulación de metal de forma conjunta con una fuerte agitación para desgasificarlo completamente.



La cinética de eliminación del hidrógeno está dominada por la transferencia de masa en el acero líquido, para la cual la ecuación de la velocidad está dada por:

$$\text{Ln} \left\{ \frac{[H]_f - [H]_{\text{equi}}}{[H]_i - [H]_{\text{equi}}} \right\} = -k_H t \quad (5.2.4)$$

Donde:

$[H]_f$ es la concentración de hidrógeno después del tiempo t (expresado en ppm)

$[H]_i$ es la concentración inicial de hidrógeno (expresado en ppm).

$[H]_{\text{equi}}$ es la concentración de hidrógeno en equilibrio (expresado en ppm).

k_H es la constante de velocidad para la eliminación del hidrógeno (expresado en min^{-1})

Reordenando la ecuación (5.2.4) en términos de la concentración final de hidrógeno se obtiene:

$$[H]_f = [H]_{\text{equi}} + \{[H]_i - [H]_{\text{equi}}\} e^{-k_H t}$$

- En los desgasificadores de tanque, la constante de velocidad k_H se determina en gran medida por el caudal del gas de agitación de argón. Podemos asumir la siguiente relación:

$$k_H = 0,0576 \cdot V + 0,02 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Siendo V la velocidad del flujo de Argón en $\text{N} \cdot \text{m}^3/\text{min}$

- En la desgasificación por recirculación (RH) emplearemos un valor de $k_H = 0,13 \text{ min}^{-1}$



5.3 Desulfuración del acero líquido

Excepto para los aceros de corte, se considera que el azufre es una impureza perjudicial en los aceros. Algunos años atrás, para grados comunes de acero solidificado a través de la ruta de la colada en lingote, el contenido de azufre máximo permisible era 0.04%. En la ruta de la colada continua, debe ser 0,02%. En la actualidad y en placas especiales de acero, las especificación en lo que respecta al contenido de azufre, lo normal es que el contenido sea de 0,005%, pero existe una demanda de acero ultra bajo en azufre (ULS) con tan sólo 10 ppm (0,001%), por ejemplo, en aceros para tuberías de gas y petróleo, en aceros resistentes al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC - Hydrogen Induced Crack) y en piezas forjadas de acero aleado.

El azufre entra en el arrabio principalmente a través de las cenizas del coque. Solamente es eliminado eficazmente del hierro fundido por la escoria en un entorno reductor, por lo tanto, tradicionalmente, el control del azufre solía hacerse durante la fabricación del arrabio en el alto horno. La eliminación del azufre en el convertidor con soplado de oxígeno no es posible debido al entorno oxidante, una excepción es el horno de arco eléctrico (EAF), donde los aceros con bajo contenido de azufre se producen a través del refinado en dos etapas.

La desulfuración en metal caliente se lleva a cabo, en un torpedo, durante la transferencia entre el alto horno y el convertidor. Actualmente, la desulfuración se realiza casi exclusivamente usando la instalación del horno cuchara (figura 12), con calentamiento eléctrico mediante tres electrodos, para lo cual la cuchara se coloca debajo de una bóveda parecida a la del horno eléctrico de arco, aunque más pequeña, dotada de tres electrodos que permiten realizar el calentamiento del baño líquido. Simultáneamente al calentamiento se realiza la agitación, mediante la inyección de argón a través de un tapón poroso que permite incrementar las reacciones químicas entre la escoria y el baño de acero. La desulfuración también se puede realizar durante el vacío, y de hecho las acerías



que tienen instalaciones combinadas de horno-cuchara y vacío realizan la desulfuración mediante el calentamiento y completan la desulfuración hasta valores muy bajos durante la operación de vacío.

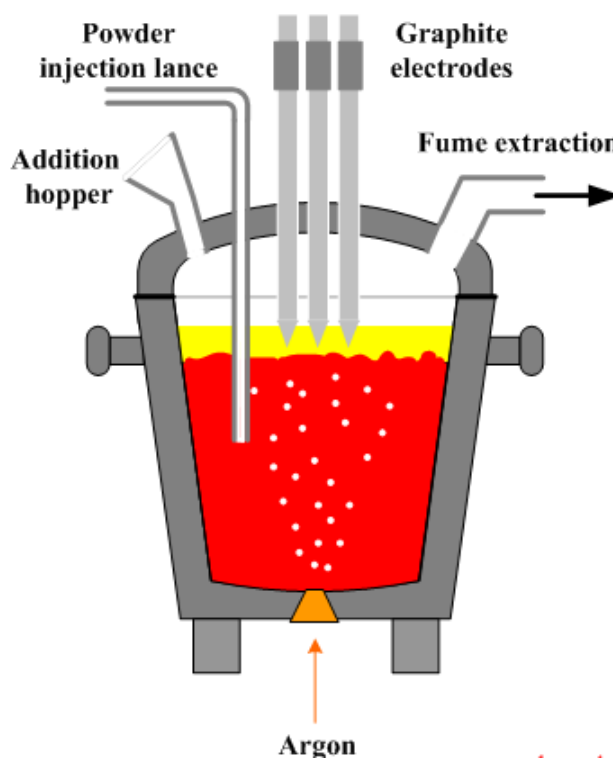
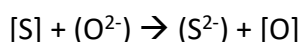
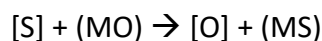


Figura 12. Esquema simplificado de un horno cuchara

La desulfuración se realiza mediante un intercambio de azufre entre el acero líquido y la escoria. Las reacciones que se producen se rigen por el contenido disuelto de aluminio y azufre en el acero y el contenido de cal, alúmina y sulfuro de calcio en la escoria. Generalmente esto se describe mediante la siguiente reacción global:



En la eliminación del azufre mediante el tratamiento con cuchara por reacción de escoria-metal, si el MO y MS no son puros, entonces es mejor utilizar la forma iónica general de la reacción de desulfuración.



$$K_6 = \frac{(a_{S^{2-}})[h_O]}{(a_{O^{2-}})[h_S]} \rightarrow (a_{O^{2-}})K_6 = \frac{(a_{S^{2-}})[h_O]}{[h_S]}$$

Si reemplazamos la actividad del azufre por el porcentaje en peso de azufre en la escoria, es decir, W_s , y usando un valor modificado de K_6 (por ejemplo, K'_6), entonces se tiene que:

$$(a_{O^{2-}})K'_6 = \frac{(W_s)[h_O]}{[h_S]} = C'_s \quad (5.3.1)$$

Donde C'_s se conoce como la capacidad de sulfuro modificada, es decir, la capacidad de una escoria para absorber azufre. La capacidad de sulfuro de la escoria (C_s), fue originalmente definida como:

$$C_s = (W_s) \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2}$$

Donde (W_s) es el porcentaje en peso de azufre en la escoria en equilibrio con un gas que tiene presiones parciales de oxígeno y azufre como p_{O_2} y p_{S_2} .

C_s es una propiedad de la escoria, y a una temperatura fija, se determina únicamente por la composición de la escoria, cuanto mayor es el valor de C_s , mayor es la capacidad de desulfuración de la escoria.

En la figura 13 se muestran los valores de C_s para algunos sistemas de escoria típicos de interés en la producción secundaria de acero. La escoria CaO-CaF₂ es superior al resto como se ve claramente en la figura 13.

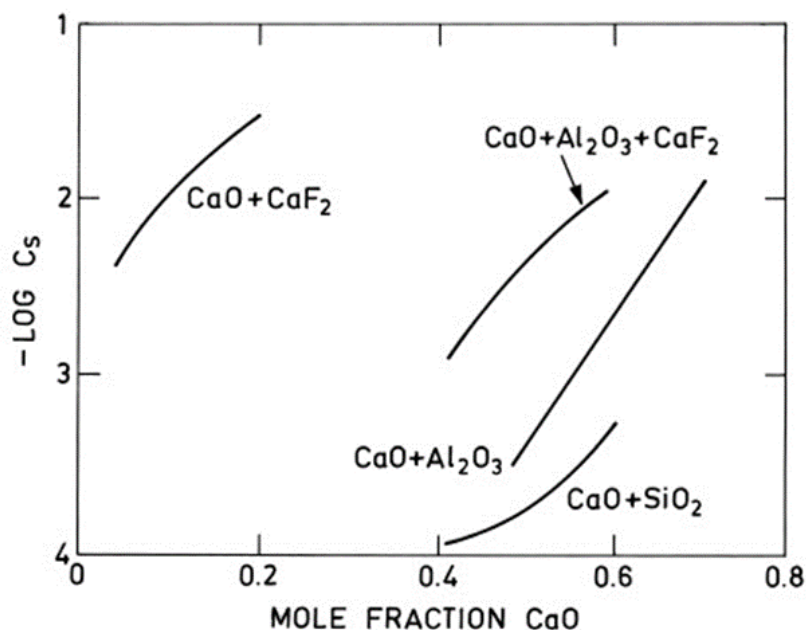


Figura 13. Capacidades de sulfuro de algunas escorias a 1873°K

C_s se determina equilibrando la escoria con una mezcla gaseosa que tiene un potencial conocido de oxígeno y azufre, sin embargo, es el equilibrio escoria-metal el que es de interés. Esto requiere el uso de un C_s modificado (C'_s) como se define en la ecuación (5.3.1). La relación entre C_s y C'_s es:

$$\log(C_s) = \log(C'_s) - 1,375 + \frac{936}{T}$$

$$\text{A } 1600^\circ\text{C} \rightarrow C'_s = 7,5 \cdot C_s$$

Otro parámetro de interés es la relación de separación del azufre de equilibrio entre la escoria y el metal (L_s). A partir de la ecuación (5.3.1), tomando $[h_s]$ como $[W_s]$, entonces, en el equilibrio de azufre metal-escoria, se tiene que:

$$L_s = \frac{(W_s)}{[W_s]} = \frac{C'_s}{[h_o]}$$

$[h_o]$ en acero líquido se determina típicamente por la presencia de un desoxidante, especialmente aluminio disuelto, aunque también se puede



relacionar con el contenido de FeO de la escoria, pero se ha encontrado más apropiado relacionarlo con el aluminio disuelto.

La figura 14 muestra los valores de L_S , en función del contenido de CaO de la escoria y del contenido de aluminio del metal, para la escoria CaO-Al₂O₃. Para una buena desulfuración, generalmente se recomienda un contenido de Al superior al 0,020%.

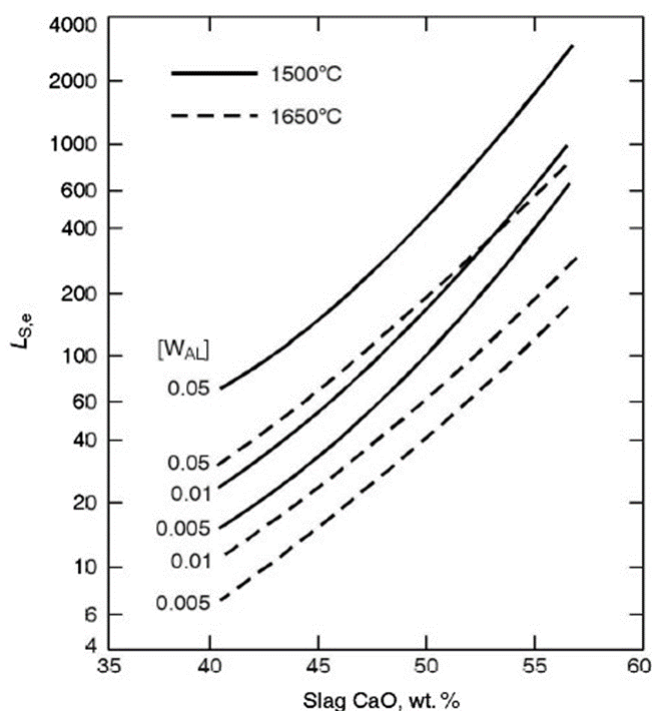
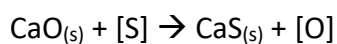


Figura 14. Relación de equilibrio del azufre entre el hierro líquido con aluminio disuelto y escorias CaO-Al₂O₃

Reconociendo que el CaO es el desulfurante predominante.



$$\log(K_{12}) = 1,191 - \frac{5304}{T}$$

$$\text{Para } T = 1600^\circ\text{C} \rightarrow K_{12} = 0,023$$

Si CaO y CaS no son puros, pero en solución en escoria, entonces:



$$K_{12} = \frac{(a_{CaS})[h_O]}{(a_{CaO})[h_S]} \rightarrow mK_{12}(a_{CaO}) = (W_S) \frac{[h_O]}{[h_S]} = C'_S$$

Donde m es una constante de proporcionalidad.

Combinado las siguientes ecuaciones:

$$\log(C_S) = \log(C'_S) - 1,375 + \frac{936}{T}$$

$$\log(K_{12}) = 1,191 - \frac{5304}{T}$$

$$mK_{12}(a_{CaO}) = (W_S) \frac{[h_O]}{[h_S]} = C'_S$$

Se obtiene:

$$\log(C_S) = \log(m) + \log(a_{CaO}) - 0,184 - \frac{4368}{T} \quad (7.17)$$

La expresión anterior nos muestra la dependencia de C_S con la temperatura y la composición.

Las Figuras 15 y 16 muestran valores de la actividad del CaO y del Al_2O_3 , en función de la composición, en los sistemas binarios CaO - Al_2O_3 y CaO - SiO_2 entre 1500 y 1600 °C. Con un 50% en peso CaO y a 1600 °C, la actividad del óxido de calcio es:

$$a_{CaO} = 0,33 \text{ en escoria CaO - } Al_2O_3$$

$$a_{CaO} = 0,01 \text{ en escoria CaO - } SiO_2 \text{ (aproximadamente)}$$

En general la actividad del óxido de calcio es 10 a 20 veces mayor en el sistema CaO - Al_2O_3 que en el sistema CaO - SiO_2 , en los rangos de composición que son de interés en el refinado en cuchara. Por lo tanto, la escoria CaO - Al_2O_3 es muy superior a la escoria CaO- SiO_2 para la desulfuración. Esto se refleja en los valores C_S de la figura 13.

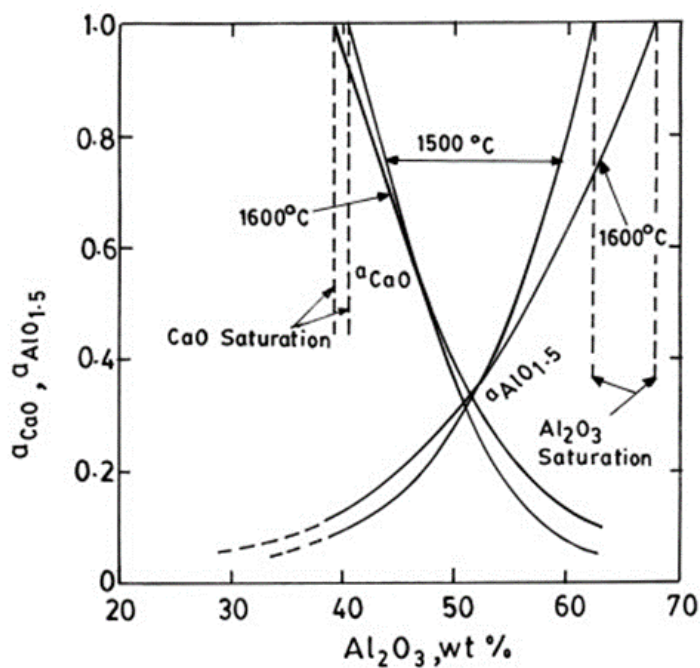


Figura 15. Diagrama de actividad frente a composición para el sistema CaO- Al₂O₃ a 1773 y 1873°K

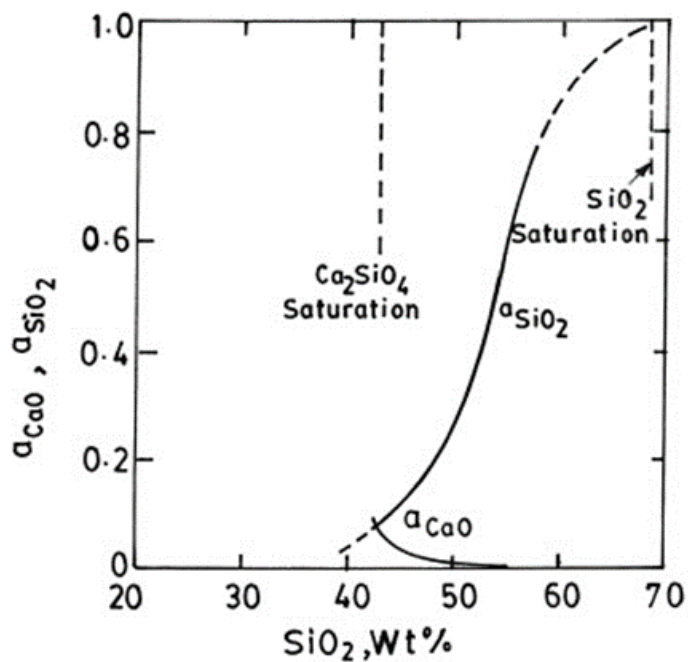


Figura 16. Diagrama de actividad frente a la composición del sistema CaO - SiO₂ a 1873°K

La figura 17 da valores de C_s en un sistema ternario CaO - Al₂O₃ - SiO₂ a 1600 ° C. En el rango de temperaturas de trabajo de la metalurgia secundaria, parece



correcto asumir que a_{CaO} es independiente de la temperatura con una composición de escoria fija, por lo tanto, si C_s se conoce a una temperatura de un diagrama tal como la figura 13, se puede estimar en cualquier otra temperatura.

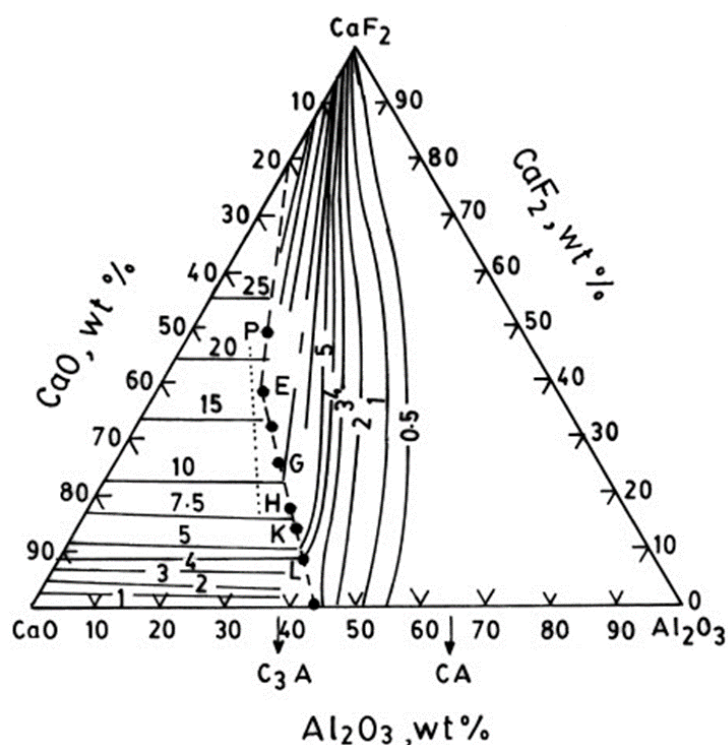


Figura 17. Capacidades de sulfuro y líquido saturado CaO (línea discontinua) para el sistema $CaF_2 - CaO - Al_2O_3$ a $1773^{\circ}K$

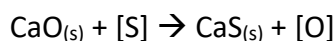
Para conseguir una buena desulfuración, se requiere un gran valor de L_s .

$$L_s = \frac{(W_s)}{[W_s]} = \frac{C'_s}{[h_o]} \rightarrow \log(L_s) = \log(C'_s) - \log(h_o)$$

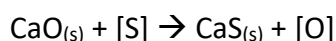
$$\log(C_s) = \log(C'_s) - 1,375 + \frac{936}{T}$$

$$\log(L_s) = \log(C_s) + 1,375 - \frac{936}{T} - \log(h_o)$$

Esto se puede conseguir por un gran valor de C_s (es decir, C'_s), pero también por un valor bajo de $[h_o]$. Con el fin de obtener una eliminación significativa de azufre del metal, el oxígeno del CaO transferido simultáneamente a la fase metálica, según la reacción:



tiene que ser eliminado por un elemento desoxidantes con una fuerte "afinidad" para el oxígeno, tal como el silicio o el aluminio, y así obtener un valor bajo de $[h_o]$. En ese sentido, el aluminio es superior al silicio, ya que permite una mayor desoxidación, la relación termodinámica entre L_s con otros parámetros para la desoxidación por aluminio puede derivarse como se describe a continuación.



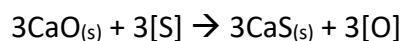
$$K = \frac{(a_{\text{Al}_2\text{O}_3})}{[h_{\text{Al}}]^2 [h_{\text{O}}]^3} = \frac{1}{K_{\text{Al}}}$$

$$\log(K_{\text{Al}}) = 20,57 - \frac{64000}{T}$$

Si se supone que $h_{\text{Al}} = W_{\text{Al}}$,

$$\log(h_{\text{O}}) = \frac{1}{3} \left[20,57 - \frac{64000}{T} - 2\log(W_{\text{Al}}) + \log(a_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \right]$$

Sumando las reacciones:



Resulta:



Simplificando, se obtiene la reacción global de la desulfuración:





Combinando las ecuaciones

$$\log(L_S) = \log(C_S) + 1,375 - \frac{936}{T} - \log(h_O)$$
$$\log(h_O) = \frac{1}{3} \left[20,57 - \frac{64000}{T} - 2\log(W_{Al}) + \log(a_{Al_2O_3}) \right]$$

Resulta:

$$\log(L_S) = \log(C_S) + 1,375 - \frac{936}{T} - \frac{1}{3} \left[20,57 - \frac{64000}{T} - 2\log(W_{Al}) + \log(a_{Al_2O_3}) \right]$$

Operando:

$$\log(L_S) = \log(C_S) - \frac{1}{3} \log(a_{Al_2O_3}) + \frac{2}{3} \log(W_{Al}) - 5,482 + \frac{20397}{T}$$

Para determinar los valores de C_S o C'_S , el uso de diagramas como el de la figura 13 no es lo más conveniente, lo que se trata de hacer es obtener una expresión analítica de C_S como una función de la composición de escoria. Se sugiere la siguiente correlación [2] a partir de datos ajustados mediante análisis de regresión estadística:

$$\log(C_S) = 3,44 \left(X_{CaO} + 0,1X_{MgO} - 0,8X_{Al_2O_3} - X_{SiO_2} \right) + 2,05 - \frac{9894}{T}$$

Sustituyendo en:

$$\log(L_S) = \log(C_S) - \frac{1}{3} \log(a_{Al_2O_3}) + \frac{2}{3} \log(W_{Al}) - 5,482 + \frac{20397}{T}$$

Se obtiene:

$$\log(L_S) = 3,44 \left(X_{CaO} + 0,1X_{MgO} - 0,8X_{Al_2O_3} - X_{SiO_2} \right) + 2,05 - \frac{9894}{T} - \frac{1}{3} \log(a_{Al_2O_3}) + \frac{2}{3} \log(W_{Al}) - 5,482 + \frac{20397}{T}$$

Y operando:



$$\log(L_S) = 3,44 \left(X_{CaO} + 0,1X_{MgO} - 0,8X_{Al_2O_3} - X_{SiO_2} \right) - \frac{1}{3} \log(a_{Al_2O_3}) + \frac{2}{3} \log(W_{Al}) - 3,432 + \frac{10503}{T}$$

Se ha propuesto la siguiente correlación [2] sobre la base del índice de basicidad óptica:

$$\log(C'_S) = \frac{B}{A} + 2,82 - \frac{13300}{T}$$

$$A = \%CaO_{(slag)} + 1,391 [\%MgO_{(slag)}] + 1,867 [\%SiO_2_{(slag)}] + 1,65 [Al_2O_3_{(slag)}]$$

$$B = 5,623 [\%CaO_{(slag)}] + 4,15 [\%MgO_{(slag)}] - 1,15 [\%SiO_2_{(slag)}] + 1,457 [Al_2O_3_{(slag)}]$$

Sustituyendo el valor de $\log(C'_S)$ en:

$$\log(C_S) = \log(C'_S) - 1,375 + \frac{936}{T}$$

Se tiene:

$$\log(C_S) = \frac{B}{A} + 2,82 - \frac{13300}{T} - 1,375 + \frac{936}{T} = \frac{B}{A} + 1,445 - \frac{12364}{T}$$

Y sustituyendo en la expresión de L_S :

$$\log(L_S) = \frac{B}{A} + 1,445 - \frac{12364}{T} - \frac{1}{3} \log(a_{Al_2O_3}) + \frac{2}{3} \log(W_{Al}) - 5,482 + \frac{20397}{T}$$

Por tanto, el valor del coeficiente de reparto, L_S , se determina por una función compleja que depende de:

- Composición de la escoria
- Contenido de aluminio disuelto y oxígeno en el acero
- Temperatura

Con el fin de minimizar la cantidad y el coste de los aditivos utilizados en la escoria de desulfuración, se requiere un alto valor de L_S , cuanto menor es el potencial de oxígeno, mayor es el coeficiente de reparto del azufre. Para un acero desoxidado por el aluminio, la actividad de oxígeno en el acero se fija por la actividad del aluminio en el acero, por lo tanto, por el contenido de aluminio.



Las variaciones del coeficiente de reparto, en función de la composición de la escoria y de una fase metálica desoxidada por el aluminio o por el silicio, se representan gráficamente en un diagrama ternario CaO - SiO₂ - Al₂O₃ (figura 18). El coeficiente de reparto puede alcanzar valores muy altos de hasta 1,000, pero varía fuertemente con la composición de la escoria.

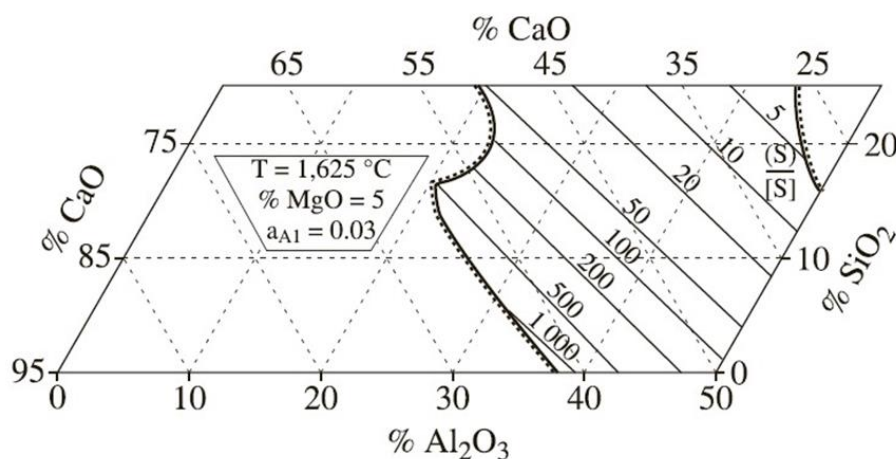


Figura 18. Diagrama ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ donde se representan las variaciones del coeficiente de reparto en función de la composición de la escoria y una fase metálica

Para conseguir un alto coeficiente de reparto, el dominio de la composición de escorias líquidas es muy estrecho las composiciones objetivo tienen que estar cerca de la saturación en cal. Por lo tanto, la obtención de una escoria con una composición adecuada es una de las cuestiones principales de la operación de desulfuración. En la práctica, esto se consigue mediante:

- Adición de una escoria desulfurante sintética basada en CaO
- Aluminio, desoxidando el acero a muy baja actividad de oxígeno (de lo contrario el Al reaccionará preferentemente con O)
- Agitación del acero en el tanque desgasificador para mezclar bien el metal y la escoria

La adición de la escoria sintética se emplea para obtener aceros limpios y para desulfurar el acero fundido, de esta forma se pueden cumplir los siguientes objetivos:



- I. Cubrir el baño de acero fundido para reducir las pérdidas de calor.
- II. Evitar la reoxidación del acero mediante el oxígeno atmosférico, debido a que las operaciones de transferencia de acero fundido se realizan bajo condiciones atmosféricas.
- III. Eliminar las inclusiones del acero fundido.
- IV. Utilizando una escoria de basicidad adecuada y con un coeficiente de reparto óptimo, el acero desoxidado puede ser desulfurado hasta un valor tan bajo como 0,005%
- V. La adición de escoria sintética es atractiva debido al bajo costo de capital del equipo.

Las principales propiedades que debe poseer la escoria sintética son las siguientes:

- Una alta capacidad de sulfuro, es decir, un alto poder de desulfuración
- Se requiere una escoria básica
- La escoria debe ser fluida para obtener velocidades de reacción más rápidas (se añade CaF_2).
- No debe causar un desgaste excesivo del material refractario de la cuchara. Una cantidad excesiva de CaF_2 produce un desgaste del refractario, una mayor temperatura también es perjudicial.
- Para una desulfuración eficiente, el acero debe ser desoxidado y el trasiego de escoria debe ser minimizado.

La desulfuración puede llevarse a cabo inyectando polvo a base de cal, por ejemplo 90% de CaO + 10% de CaF_2 o 70% de CaO + 20% de Al_2O_3 + 10% de CaF_2 . La velocidad de inyección, normalmente varía de 2 a 4 kg por tonelada de masa fundida. El fluoruro de calcio aumenta la capacidad de desulfuración de la escoria y ayuda a fluidizarla. El aluminio debe estar presente con el fin de desoxidar el acero fundido puesto que la transferencia de azufre del acero fundido a la escoria es seguida por la transferencia de oxígeno de la escoria al acero, por lo tanto, la desoxidación del acero es indispensable para que la



desulfuración sea eficaz. Cuando los materiales que forman escorias se inyectan en la masa fundida, se funden y las partículas de escoria fundidas empiezan a subir y se acumulan en la superficie superior de la masa fundida. La reacción de desulfuración se produce de dos maneras:

- I. Durante el contacto entre las partículas de escoria fundida y la masa fundida (figura 19), en este mecanismo de desulfuración es importante que la escoria sintética en polvo se funda durante la inyección. El tiempo de residencia de las partículas ascendentes en la masa fundida es también importante, lo que significa que la velocidad de inyección de gas y polvo debe seleccionarse adecuadamente. El polvo se funde y el gas ascendente da lugar a la mezcla en la masa fundida, este mecanismo se conoce como contacto transitorio.
- II. Contacto entre la escoria superior y el metal fundido (figura 20). Cuando las partículas de escoria fundidas se elevan se acumulan en la superficie superior de la masa fundida y después de un tiempo la escoria también participa en la desulfuración. En este mecanismo escoria - metal la zona de interfaz es importante. La velocidad de inyección de gas puede seleccionarse adecuadamente para producir y arrastrar pequeñas gotas de escoria en la masa fundida para que las velocidades de reacción sean más rápidas. Una vez que se inyecta todo el polvo, la reacción entre la escoria superior y el azufre de la masa fundida rige el contenido final de azufre del acero, este mecanismo se conoce como contacto permanente.

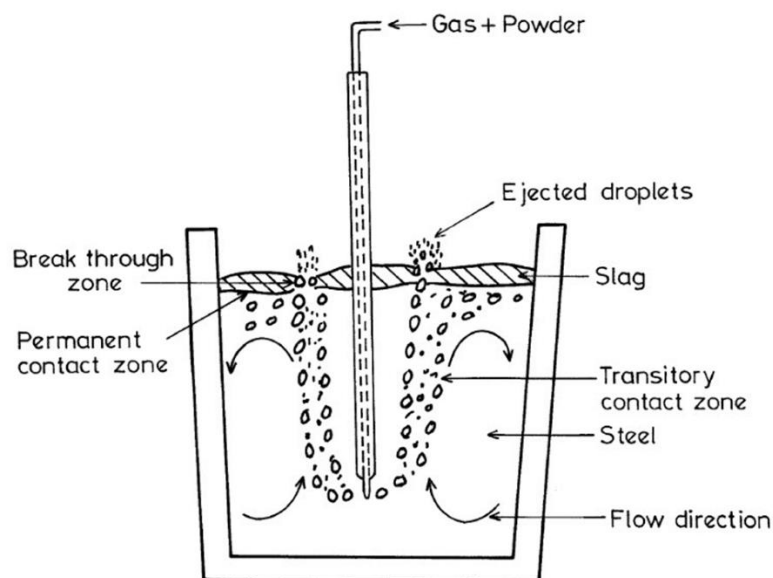


Figura 19. Desulfuración provocada por el contacto entre partículas de escoria fundida y masa fundida (contacto transitorio)

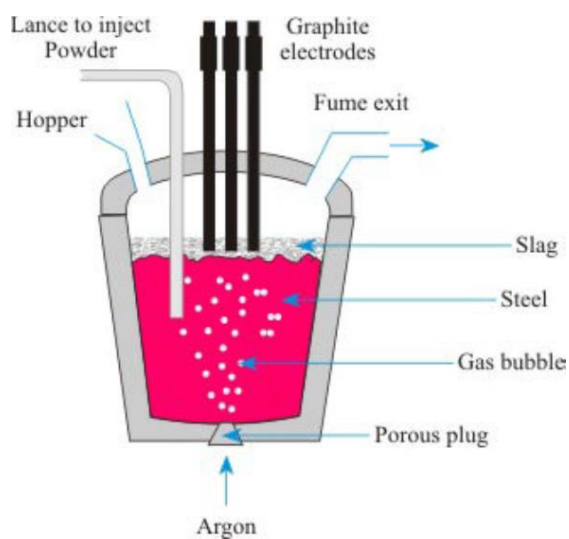


Figure 20. Desulfuración provocada por el contacto entre escoria superior y metal fundido (contacto permanente)

La principal diferencia entre la desulfuración externa, considerada como aquella que es parte del pre tratamiento de la cuchara del metal caliente, y la desulfuración que tiene lugar en la metalurgia secundaria, es que normalmente las cucharas de metal caliente no tienen agitación inferior a través de tapones



porosos, mientras que en las cucharas de metalurgia secundaria si disponen de dicho tapón poroso, a través del cual, se inyecta argón en la cuchara. En la desulfuración del metal caliente, la agitación y la adición de agentes desulfurantes se consigue mediante una lanza que se sumerge en la masa fundida desde la parte superior.

La metalurgia de inyección solamente se practica en la fabricación de acero cuando es necesario alcanzar una desulfuración elevada, como es el caso de la producción de aceros de ultra bajo contenido de azufre (ULS). De lo contrario, la desulfuración por tratamiento con escoria sintética sobre el acero fundido en la cuchara, el horno de cuchara o durante el tratamiento al vacío es suficiente. Las adiciones principales son CaO y Al, aunque también se requieren algunos CaF_2 , SiO_2 y Al_2O_3 para la formación de escoria. De todo lo anterior se puede concluir que en el proceso de desulfuración hay que:

- Especificar la masa de escoria a añadir, cuanta más escoria se agrega, más azufre se puede eliminar, esto debe ajustarse al coste de la escoria.
- Especificar la composición de la escoria en términos de la relación entre CaO y Al_2O_3 . Las escorias con mayores concentraciones de CaO tienden a tener un mayor coeficiente de reparto, L_s , y por lo tanto son más eficaces para eliminar el azufre. Sin embargo, existe el riesgo de que la escoria se solidifique a mayores niveles de CaO, a menos que se mantenga una temperatura suficientemente alta.

6 PROCESOS Y EQUIPOS DE METALURGIA SECUNDARIA

La metalurgia secundaria como se ha explicado antes se compone de una serie de procesos que tienen la finalidad de conseguir un acero con las características más adecuadas según la futura aplicación que se le vaya a dar. Antes de detallar los procesos de tratamiento que se le dan al acero debemos tener claro cuáles



son los materiales presente previos al tratamiento. Los materiales que entran a los procesos de metalurgia secundaria son los siguientes:

- El acero líquido procedente del horno eléctrico o del convertidor.
- Las adiciones, materiales que se añaden al acero para ajustar su composición, generalmente ferroaleaciones.
- Argón, un gas inerte sin capacidad de alterar la composición química del acero que permite homogeneizar la masa de acero en composición y temperatura.
- Desulfurantes, empleados para combinarse con el azufre del acero y depositarlo en la escoria, los desulfurantes más empleados son el magnesio y el calcio.

Los procesos de tratamiento de metalurgia secundaria buscan cumplir los objetivos expuestos en el apartado previo, es decir, conseguir un ajuste de composición del acero mediante adiciones o la agitación y homogeneización del baño de acero, un ajuste de tempera que normalmente se consigue con un caldeo eléctrico mediante electrodos, y por último la desgasificación y eliminación de inclusiones del acero mediante procesos de desgasificación por vacío principalmente. En definitiva, los procesos de tratamiento de la metalurgia secundaria están basados en sistemas compuestos que permiten conseguir todos los objetivos citados. A continuación se desarrollarán los principales procesos de tratamiento de metalurgia secundaria, pero previamente se explicarán los principales sistemas de agitación y homogeneización empleados en metalurgia secundaria.

6.1 Agitación y homogeneización

El proceso de agitación y homogeneización se puede considerar como una parte del tratamiento secundario del acero. Aunque se mencionará en el desarrollo de



los procesos principales de tratamiento es importante tener una idea clara de su finalidad y los tipos de sistemas existentes, por eso en este apartado se explicarán con más detalle. La agitación y homogeneización del baño de acero de la cuchara tiene varios objetivos, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- I. Homogeneizar la temperatura y composición química del baño
- II. Remover el baño para para movilizar las inclusiones presentes en el acero
- III. Favorecer intercambios escoria – metal que son trascendentales para procesos como la desulfuración

El proceso de agitación y homogeneización se puede realizar de tres maneras diferentes:

- Mediante la inyección en el acero contenido en la cuchara de un gas inerte como Argón. El flujo de Argón va eliminando los gases en solución del baño de acero mediante un movimiento de barrido, la inyección se puede llevar a cabo de dos formas:
 - Inyección del argón a través de una lanza que se introduce en el baño de acero contenido en la cuchara (figura 21).

Lo más destacado de este método es:

- Permite una buena eliminación del azufre y el fósforo, ya que al igual que la agitación mediante inyección por tapones porosos en el fondo de la cuchara hay un excelente buen contacto entre el acero y la escoria.
- Este método de inyección es muy simple, requiere menos costes de inversión y de operación, sobretodo en comparación con la agitación electromagnética

Los principales inconvenientes que plantea este sistema son:

- No proporciona una agitación homogénea en todo el baño



- Suelen oxidarse los aleantes adicionados
- Mediante este método de inyección de Argón se produce una cierta absorción de nitrógeno y oxígeno

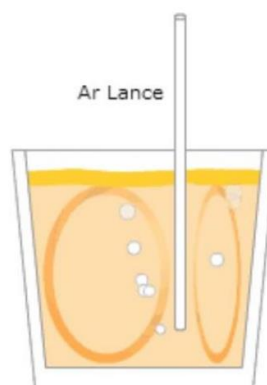


Figura 21. Esquema de la inyección de Argón mediante lanza

- Inyección del Argón mediante tapones porosos en el fondo de la cuchara (figura 22).

Las principales ventajas de este tipo de agitación son:

- Proporciona una agitación uniforme sin apenas zonas muertas
- Permite una buena eliminación de azufre y fósforo debido al excelente contacto que ofrece entre la escoria y el metal
- Posibilidad de agitar la cuchara en cualquier parte de forma continua

Las desventajas más importantes son:

- Construcción más exigente
- Mayor desgaste en el material refractario

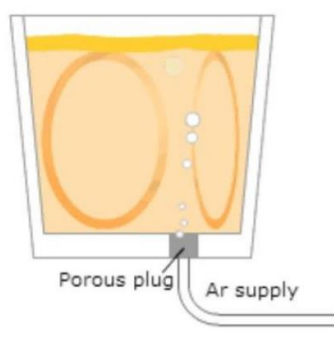


Figura 22. Esquema de la inyección de Argón a través de tapón poroso

- A través de agitación electromagnética (EMS), en este sistema se usa un horno de inducción en lugar de la cuchara, dicho horno está rodeado por una bobina de inducción que produce corrientes de convección en el baño para que se produzca la desgasificación del acero.

La agitación electromagnética tiene unas ventajas muy significativas, entre las que destacan:

- Mediante este sistema de agitación se consigue un acero más limpio
- El flujo que proporciona es suave y uniforme, además también es reversible
- La absorción de nitrógeno e hidrógeno es mínima
- El desgaste del material refractario es mínimo
- La seguridad de este sistema es muy buena y su construcción muy simple
- La pérdida de aleantes, y la oxidación de los mismos también es mínima

Los principales inconvenientes que presenta este sistema son:

- Mayores costes de capital y de operación
- La eliminación de azufre y fósforo con este método es menor debido a un peor contacto entre la escoria y el metal.



- Mezclado pulsatorio o pulsating mixing (PM), utilizado para el mezclado y homogeneizado de las adiciones, principalmente las ferroaleaciones. El sistema está formado por un pescante giratorio de columna sobre el que va colocado una tolva de adiciones para alimentar directamente al tubo que se sumerge en el acero de la cuchara, a este tubo se le denomina snorkel. El snorkel está conectado con una bomba de vacío y con una inyección de gas inerte o nitrógeno, las dos entradas reguladas mediante dos válvulas, una de regulación de flujo y una válvula solenoide. La cuchara es movida mediante un carro porta-cuchara, cuando la cuchara está colocada justo debajo del snorkel, se introduce dentro de la misma y se hacen las adiciones. A continuación la entrada o conexión a la bomba de vacío se abre para que el acero ascienda, después se cierra la conexión de la bomba de vacío y se abre la del nitrógeno, provocando que el acero descienda a la cuchara junto con las adiciones, y se produce la fusión y mezclado. El proceso se repite una y otra vez hasta que se consiga una fusión completa y una mezcla homogénea de las adiciones.

6.2 Principales procesos de tratamiento de metalurgia secundaria

Los procesos de tratamiento del acero, también llamados de forma general como procesos de desgasificación, aunque no solo desgasifican el acero, también permiten ajustar la composición del baño de acero, eliminar y modificar inclusiones no metálicas y ajustar su temperatura. Dichos procesos los podemos dividir en dos tipos principalmente:

- I. Procesos de tratamiento por vacío, que pueden ser a su vez de dos tipos, con y sin aporte térmico
- II. Procesos de tratamiento a presión atmosférica, al igual que los vacío también pueden ser con y sin aporte térmico



Los procesos de vacío consiguen unos resultados notables, en cambio los tratamientos a presión atmosférica no consiguen resultados tan buenos, pero la relación entre resultados e inversión obtenida a presión atmosférica es mejor. Una mayor inversión en procesos de vacío es necesaria siempre que el objetivo sea fabricar de forma continua un acero de características específicas rigurosas y para aplicaciones que requieran aceros con un grado de impurezas mínimo. El coste de los procesos a presión atmosférica es menor, la inversión en estos sistemas es mucho menor que en los procesos de vacío. Los procesos a presión atmosférica son sistemas usados en acerías más modestas en las cuales los requerimientos del acero a producir no son tan exigentes y no buscan obtener un acero de una calidad superior. Dentro de cada proceso, ya sea de vacío o atmosférico pueden ser con o sin aporte térmico adicional, este se debe a que durante las diferentes operaciones que se realizan en estos tratamientos, como la inyección de gas, la adición de aleantes y escorificantes, la temperatura del baño de acero se puede reducir considerablemente, siendo inadmisibles en algunos casos, es por eso que se añade a estos sistemas de tratamiento un calentamiento del baño de acero, este calentamiento se puede conseguir mediante caldeo por oxígeno o caldeo eléctrico a través de electrodos.

6.1.1 Tratamiento por vacío

Los procesos de tratamiento por vacío se basan en el uso de bombas de vacío para conseguir desgasificar el acero de forma adecuada, dentro de este tipo de tratamientos podemos diferenciar procesos de vacío sin aporte térmico y con aporte térmico. La principal diferencia entre ambos procesos radica en la aportación adicional de un calentamiento del baño de acero para solventar los problemas de enfriamiento que se producen en los procesos de desgasificado.



6.1.1.1 *Tratamiento por vacío sin aporte térmico*

Los procesos de vacío sin aporte térmico se basan en el uso de una bomba de vacío, entre los principales sistemas de vacío sin aporte térmico están la desgasificación estática, desgasificación en chorro, método de elevación intermitente y el método de elevación y circulación.

- Desgasificación estática en cuchara o Vacuum Degassing (proceso VD). Este proceso fue de los primeros en desarrollarse, es muy sencillo, es uno de los más empleados y simplemente consiste en introducir la cuchara llena en una cámara en la que se hace el vacío aproximadamente a 0,04 atm durante 10 minutos, a esta cámara también se le denomina tanque desgasificador (figura 23). El vacío inducido provoca una ebullición violenta que eleva el nivel del acero en la cuchara cerca de 50 cm de altura, por lo que es obligatorio emplear cucharas relativamente altas. Es importante añadir que, antes del desgasificado se debe eliminar de la cuchara toda la escoria posible para que cuando se haga el vacío el acero solo esté recubierto por una capa muy delgada de escoria que no dificulte el escape de los gases. Este sistema es muy simple, pero presenta ciertos inconvenientes, como la dificultad para conseguir una buena homogeneización del metal o una desgasificación incompleta debido a que la presión ferrostática solo permite la formación de burbujas cerca de la superficie, y solo se consigue una desgasificación óptima del metal en la zona inferior a dicha superficie. Para reducir estas desventajas, entre otras, generalmente se incluyen sistemas de agitación en la cuchara como los que ya se han citado previamente como la inyección de Argón en la cuchara o la agitación electromagnética.

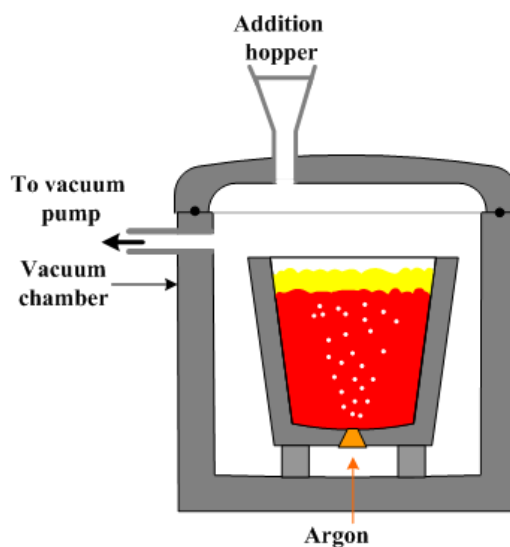


Figura 23. Esquema del proceso Vacuum Degassing o tanque desgasificador

- Desgasificación en chorro o Bochümer Verein (proceso BV)
Este proceso se basa en la desintegración espontánea que sufre un chorro de acero cuando es vertido a una cámara de vacío. En el interior de la cámara de vacío el acero se fragmenta en finas gotas de acero que facilitan el desprendimiento de los gases debido a que las burbujas de gas en finas gotas de acero pueden liberarse muy fácilmente. Este proceso se puede realizar de varias formas:
 - Del horno a la cuchara que actúa como cámara de vacío
 - De una cuchara a otra ubicada dentro de la cámara de vacío
 - De la cuchara a una gran lingotera situada en una cámara de vacío (figura 24)

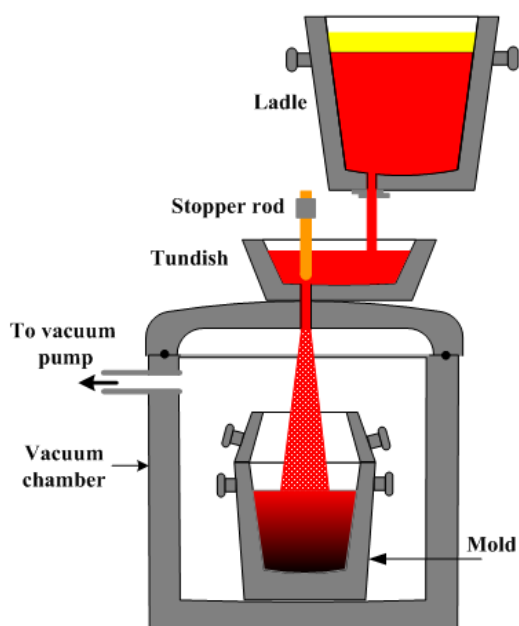


Figura 24. Esquema del proceso de desgasificación en chorro, de cuchara a lingotera

- Elevación intermitente o Dortmund-Hörder Hüttenunion AG (proceso DH)
Es un proceso basado en la toma de lotes o fracciones de acero líquido de la cuchara para después someterlas al vacío, así hasta que todo el acero líquido haya sido desgasificado. Para hacer el vacío se emplea una cámara de vacío conectada a unas bombas de vacío, la cámara cuenta con un tubo que sobresale por su parte inferior denominado “snorkel”, este tubo se introduce en el acero líquido contenido en la cuchara y de esta forma se consigue hacer el vacío para desgasificar el acero. En la figura 25 se representa gráficamente el proceso de elevación intermitente descrito [5]. Debido al vacío inducido, se genera una diferencia de presión entre la cámara de vacío y la atmosfera exterior provocando el ascenso del acero por el snorkel. Una vez el acero líquido entra en la cámara de vacío se produce un fuerte barboteo con proyección de partículas consiguiendo de esta forma desgasificar el acero. A continuación se disminuye la intensidad del vacío o lo que es lo mismo se eleva la presión y el acero desciende por el tubo para ser



devuelto a la cuchara. El proceso se repite varias veces para conseguir desgasificar todo el baño de acero.

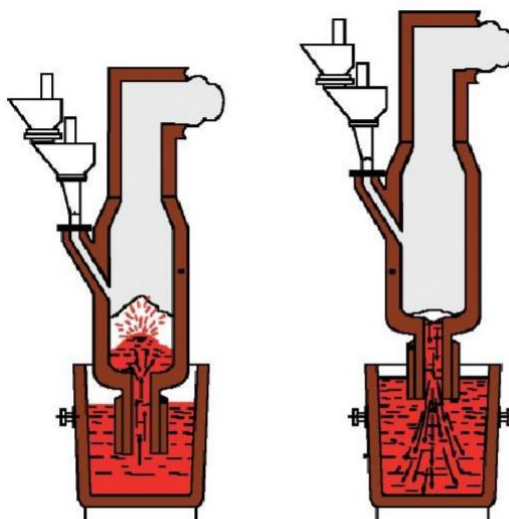


Figura 25. Esquema del proceso de elevación intermitente (DH)

- Elevación y recirculación o Ruhrstahl-Heräus AG (proceso RH)

Este proceso también utiliza una cámara de vacío que va desgasificando el acero líquido por fracciones, se basa en el mismo principio que el proceso DH, pero en este caso la cámara de vacío dispone de dos tubos o snorkels que se introducen en el acero de la cuchara. Para que resulte más fácil de comprender el proceso, la cámara de vacío, también denominada reactor RH se puede visualizar de forma gráfica en la figura 26. El funcionamiento de este proceso es el siguiente, la cámara se hace descender hasta que los extremos de ambos tubos (snorkels) están introducidos en el acero de la cuchara [5]. Una vez sumergidos ambos en el baño de acero, se inyecta un chorro de gas inerte por uno de ellos, y de forma simultánea comienza a hacerse el vacío en la cámara. Pasado un tiempo cuando se hace un cierto vacío en la cámara, el acero asciende por el snorkel por el que se inyecta argón. La inyección del gas sirve para facilitar la aspiración del acero por el tubo, debido a que esa inyección de



argón reduce la densidad aparente del acero permitiendo que se eleve por el tubo, el acero líquido entra en la cámara donde sufre una fuerte atomización y se desgasifica. Después, el acero cae por gravedad a través del segundo tubo y vuelve a la cuchara, estableciéndose una circulación continua del acero entre la cuchara y la cámara de vacío o reactor de recirculación.

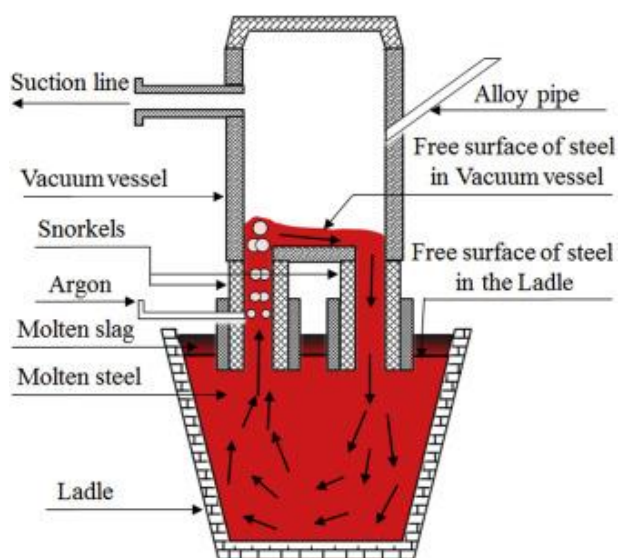


Figura 26. Esquema del proceso de desgasificación por recirculación (RH)

6.1.1.2 Tratamiento por vacío con aporte térmico

La adición de un calentamiento adicional en los procesos de tratamiento por vacío se puede hacer de dos formas, mediante la inyección de oxígeno o eléctricamente. A continuación se describen los principales procesos de vacío con aporte térmico.

- Proceso ASEA-SKF

El nombre de este proceso se debe a la unión de las empresas ASEA y SKF, normalmente es utilizado para el tratamiento de acero oxidado



proveniente de horno de arco eléctrico de ultra potencia aunque también puede tratar aceros procedentes de hornos eléctricos de arco normales, hornos eléctricos de inducción de frecuencia normal, convertidores LD y hornos Siemens-Martín. Además de la desgasificación este proceso puede realizar otras operaciones como el ajuste de temperatura y composición, la desoxidación, desulfuración, descarbonación, y eliminación y modificación de inclusiones.

El acero cuando se introduce en el horno eléctrico de ultra potencia es sometido a los procesos de fusión y oxidación, una vez finalizado este tratamiento es traspasado a la cuchara mediante la cual se transporta a la terminal de tratamiento del proceso ASEA-SKF, en el momento que se cola el acero a la cuchara esta se cierra herméticamente con una junta de goma para conseguir producir un vacío óptimo. El tratamiento ASEA-SKF consiste en una desgasificación junto con una agitación mediante la inyección de gas inerte, y después se somete el acero a un calentamiento por arco eléctrico y se adicionan las ferroaleaciones necesarias. En ese momento se daría por finalizado el proceso y ya se procedería a la colada del acero líquido. La figura 27 muestra de forma simplificada las diferentes fases que componen el proceso ASEA-SKF descrito en este párrafo.

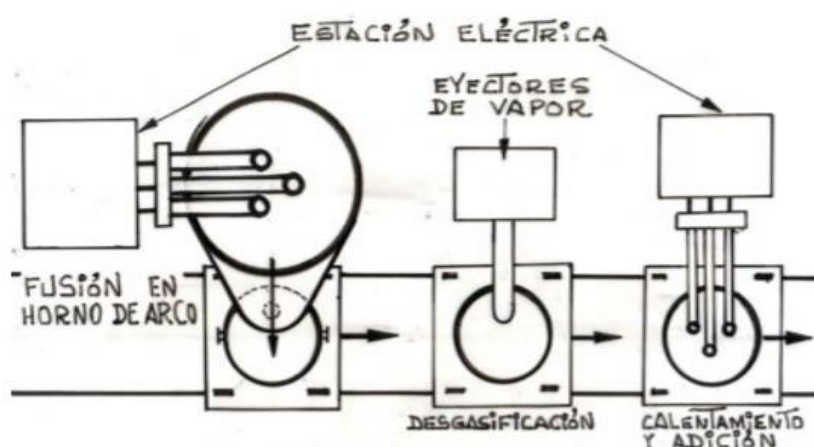


Figura 27. Fases del proceso ASEA-SKF



En este proceso ya no se usan bombas de vacío para crear el vacío, se emplean eyectores de vapor que son más seguros y además considerablemente más potentes y en consecuencia más rápidos. La agitación se logra a través de una bobina de inducción [19] que puede estar fija o ir montada sobre el carro porta-cucharas, esta bobina induce un movimiento en el baño de acero facilitando la extracción de gases y las reacciones metalúrgicas. Es importante añadir que para que la inducción magnética sea efectiva la parte superior de la cuchara es de acero inoxidable austenítico que es amagnético y permite el paso del flujo magnético. En la mayoría de casos, de forma simultánea a la inducción magnética se realiza una inyección de Argón a través de un tapón poroso situado en el fondo de la cuchara. Las cucharas van montadas sobre carros porta-cucharas y deben tener una altura adecuada para que la agitación sea intensa y no haya riesgo de desbordes o escapes por la parte superior. El siguiente paso como se ha enunciado antes se trata del calentamiento, una vez finalizado el desgasificado se quita la tapa de goma que cierra herméticamente la cuchara y colocando encima de la cuchara una nueva tapa con tres electrodos, muy similar a un bóveda de un horno eléctrico. El equipo de tratamiento de esta fase de calentamiento es estacionaria, es la cuchara la que se desplaza mediante el carro.

- Horno cuchara Stein Heurtey – S.A.F.E.

Es otro tipo de desgasificación por vacío con aportación térmica, en este caso consiste en un horno cuchara que permite crear el vacío y calentar el acero de forma simultánea. El horno consta de una tapa con electrodos móviles que cierra herméticamente el horno, y además el acoplamiento con la tolva de adiciones y la conexión con el equipo de vacío. La forma de operación general se basa en un calentamiento previo del acero durante unos 20 minutos, y después se retiran los electrodos y se crea el



vacío a unos 133 Pa entre 10 y 20 minutos, y durante todo el proceso se inyecta Argón a través de una tobera lateral situada en la parte baja del horno cuchara.

- Horno cuchara en cámara de vacío
Este es otro proceso de desgasificación por vacío con calentamiento, pero en este caso el tratamiento se realiza en una cámara de vacío o tanque desgasificador, no en la propia cuchara. Un proceso de este tipo es el Vakuum Metallurgie (VM), la cuchara se coloca en el interior de una cámara que cuenta con conexiones a bombas de vacío, tuberías para inyectar el gas inerte y provocar la agitación en la zona inferior, conexión con la tolva de adiciones y una tapa o bóveda para cerrarse de forma hermética y por la que pasan los electrodos. Otros sistemas que tienen un fundamento muy similar son la desgasificación por arco de vacío o también conocido como Vacuum Arc Degassing (VAD), cuyo esquema de proceso puede verse en la figura 28, VAD Finkl-Mohr, y el Diado Ladle Furnace. Al igual que en el Vakuum Metallurgie se produce una desgasificación con calentamiento en un tanque desgasificador mediante electrodos, de forma conjunta se inyecta Argón para agitar el baño de acero, cuando se procede a la desgasificación se retiran los electrodos y se tapa la cuchara con una junta hermética. Cuando nos referimos a la desgasificación por arco de vacío debemos citar el horno cuchara Finkl-Mohr que fue un proceso basado en este sistema que tuvo un gran éxito. Este proceso puede ser de dos tipos diferentes, uno está formado simplemente por el horno cuchara con una cubierta hermética por la que pasan los electrodos para producir el calentamiento, y el otro se compone también de una cámara de vacío en la que se introduce la cuchara. Paralelamente al calentamiento se provoca un ligero vacío a una presión cercana a 0,25 atm y se inyecta Argón en la cuchara, una vez completado el calentamiento se retiran los electrodos y se reduce la



presión para generar un vacío completo para permitir una desgasificación completa.

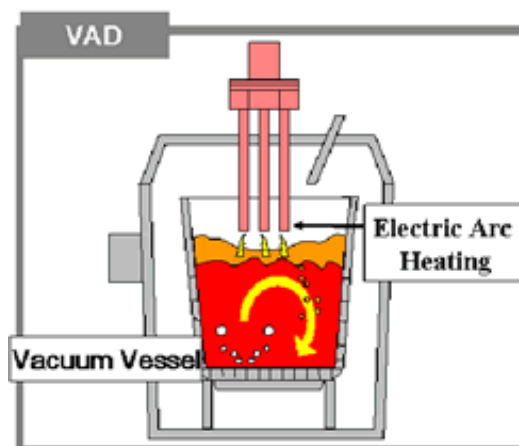


Figura 28. Esquema del proceso Vacuum Arc Degassing

- Vacuum Oxygen Decarburisation (VOD)
Este sistema de desgasificación también emplea un tanque desgasificador o cámara hermética donde se introduce el acero y es tratado en vacío. La cámara está conectada a varias bombas de vacío de eyectores de vapor, por la tapa que cubre la cámara se introduce una lanza por la que se inyecta oxígeno. Además también consta de la entrada para las adiciones alimentadas por una tolva, un pequeño orificio para controlar el proceso, toma de muestras y pirometría, y en un lateral en la parte baja de la cámara cuenta con la entrada para la inyección de Argón por el tapón poroso de la cuchara. El proceso consiste en introducir la cuchara con el acero líquido en la cámara o tanque VOD (figura 29) y se cierra herméticamente, a continuación se encienden las bombas de vacío y cuando llegue a una presión de 0,1 atm aproximadamente comienza la inyección de oxígeno por la lanza de la parte superior, simultáneamente se inyecta Argón por la parte inferior para provocar la agitación. Mediante esa adición de oxígeno se permite realizar la reacción de descarburación dado que el vacío creado favorece la reacción en la que se genera un gas como el CO que escapa del baño de acero en lugar de



favorecer la formación de un óxido líquido que pase a la escoria. Después cuando el baño de acero se encuentra saturado en oxígeno se detiene la inyección del mismo y se crea un vacío mayor, junto con la agitación provocada por el gas inerte el acero se enfría un poco. Y por último se añaden las ferroaleaciones, elementos fundentes y escorificantes por las esclusas de vacío para conseguir de esta forma ajustar la composición química del baño de acero, con un contenido en azufre mínimo, inferior al 0,001%.

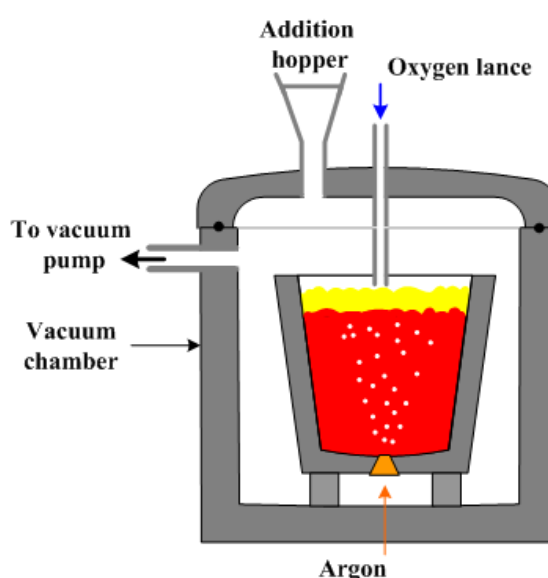


Figura 29. Esquema del proceso Vacuum Oxygen Decarburisation

- Proceso Allegheny Vacuum Refining (AVR)
Es un proceso derivado del proceso VOD, muy similar, la principal diferencia radica en que la inyección de oxígeno se realiza por debajo del nivel de acero en la cuchara. El oxígeno se inyecta mediante una lanza consumible que tiene cinco tubos interiores en espiral para distribuir el oxígeno de forma más eficiente y no provocar salpicaduras. Al igual que en el sistema VOD se inyecta Argón a través del tapón poroso del fondo de la cuchara para agitar el baño de acero y favorecer la homogeneización de todos los elementos adicionados con el metal.



- **Proceso RH-OB**

Este proceso se basa en el mismo funcionamiento que el proceso de elevación y recirculación (RH) pero además incorpora una inyección de oxígeno que permite la descarburación del acero a tratar y también el calentamiento de coladas que hayan podido sufrir un pequeño enfriamiento en el paso del convertidor a la metalurgia secundaria. Este tipo de sistema se utiliza generalmente cuando del convertidor se obtiene una colada con escoria cromada, la cuchara se introduce en el reactor RH donde se produce la desgasificación y descarburación completa. El baño de acero de la cuchara se somete a la desgasificación por vacío conjuntamente con la inyección de oxígeno y Argón a través de dos tubos concéntricos por la parte inferior de la cámara de vacío o reactor RH, por el tubo interior circula el oxígeno y por el exterior el Argón. Una vez el acero ha sido descarburizado por completo se adicionan ferroaleaciones, elementos reductores y escorificantes para reducir el óxido de cromo y el metal contenido en él es devuelto al baño de la cuchara, estando ya ese acero listo para la colada.

6.1.2 Tratamiento a presión atmosférica

Los procesos de tratamiento atmosféricos son menos efectivos que los procesos de vacío en lo que a calidad del acero obtenido se refieren, como ya se ha comentado antes. Las exigencias actuales del mercado demandan aceros con un grado de pureza elevado, para que en su futura aplicación el rendimiento sea excelente y generalmente este tipo de procesos no cumplen con ese objetivo, aunque la inversión que suponen es bastante menor. Los diferentes sistemas o procesos de tratamiento a presión atmosférica tienen en común que todas las



operaciones se llevan a cabo en la propia cuchara, debido a esto también se les puede denominar como procesos de desgasificación o metalurgia en cuchara. Otro punto en común es que todos los procesos se realizan a presión atmosférica e incorporan una inyección de Argón. Estos procesos de metalurgia en cuchara tienen varias desventajas como un mayor consumo eléctrico, una mayor adición de arrabio líquido para compensar el enfriamiento del acero, o una mayor duración del proceso. Los principales puntos fuertes que podemos destacar son, una mejor oxidación mediante la adición de aleaciones, la inyección de Argón, y la adición de escorias sintéticas que también favorecen la eliminación de inclusiones y especialmente la desulfuración. Existen sistemas para calentar las cucharas por arco eléctrico pero el coste de inversión se eleva considerablemente, la inyección por alambre de calcio o silicio-calcio pulverizado también se emplea en estos procesos para controlar la forma de óxidos y sulfuros presentes, pero su coste también es muy elevado. A continuación se explican los principales procesos de tratamiento de este tipo.

6.1.2.1 Tratamiento a presión atmosférica sin aporte térmico

Los principales procesos de tratamiento o desgasificación a presión atmosférica sin calentamiento adicional son los siguientes:

- **Purga de Argón (AP)**

El método más sencillo, se basa únicamente en la inyección de un gas inerte como el Argón mediante una lanza de inyección que se hunde en el baño de acero de la cuchara o a través de un tapón poroso en el fondo de la cuchara si dispone de él. Por la parte superior se adicionan los escorificantes y las aleaciones a través de una tolva, y junto con la inyección de Argón se consigue una buena homogeneización de desoxidantes para inducir la desoxidación y en consecuencia la eliminación de las inclusiones presentes.



- **Tratamiento convencional con inyección de gas**

Este es otro sistema muy simple, consiste en una inyección de gas inerte, ya sea mediante un tapón poroso en el fondo de la cuchara o por una lanza que se introduce en el baño de acero inyectando el gas en la parte inferior de la cuchara. La inyección de Argón al igual que en el resto de tratamientos permite mejorar la homogeneización y agita el baño de acero favoreciendo la desgasificación arrastrando los gases y las inclusiones a la superficie del baño de acero. Pero en este sistema la inducción de Argón también moviliza la escoria de la superficie del baño de acero haciendo que quede una zona libre de esa escoria, y es en esa zona donde se adicionan las aleaciones y los escorificantes para contribuir a la desgasificación. La ausencia de escoria hace que la adición se más efectiva permitiendo una mejor acción de los elementos incorporados al baño de acero.

- **Tratamiento Capped Argon Bubbling (CAB)**

Es un sistema muy similar al tratamiento convencional desarrollado previamente, pero en este caso se realiza tapando la cuchara. Dicha tapa consta de dos orificios, uno para la adición de aleaciones y escorificantes, el otro para tomar muestras y observar el proceso. La inyección de Argón en este se realiza a través del tapón poroso del fondo de la cuchara.

- **Proceso de ajuste de composición con oxígeno o Sealed Argon Bubbling with oxygen (CAS-OB)**

El proceso CAS-OB es uno de los mejores sistemas para la adición de aleantes en atmosfera inerte para mejorar la limpieza del acero y la recuperación de elementos añadidos. Este tipo de tratamiento tiene un fundamento idéntico al Capped Argon Bubbling pero es más sofisticado. En este caso la tapa usada para cerrar la cuchara tiene una campana que



se introduce en el baño de acero formando un hueco estanco por el que aflora el flujo de Argón inyectado por el tapón poroso. El flujo de Argón moviliza la escoria dejando la zona de la campana libre de escoria en la superficie del baño de acero. La campana tiene tres entradas, una para la inyección de aleaciones y escorificantes sobre la zona libre de escoria, otra para la entrada de un gas de protección, cuya función es la de evitar la oxidación de las adiciones de aleaciones y elementos reductores, y una última entrada de oxígeno mediante una lanza que favorece la descarburación. El tratamiento CAS-OB es una versión mejorada del tratamiento Sealed Argon Bubbling (CAS), la diferencia es la adición de una inyección de oxígeno que en el sistema CAS no está presente. En la figura 30 se puede ver el esquema completo de un sistema CAS-OB [5].

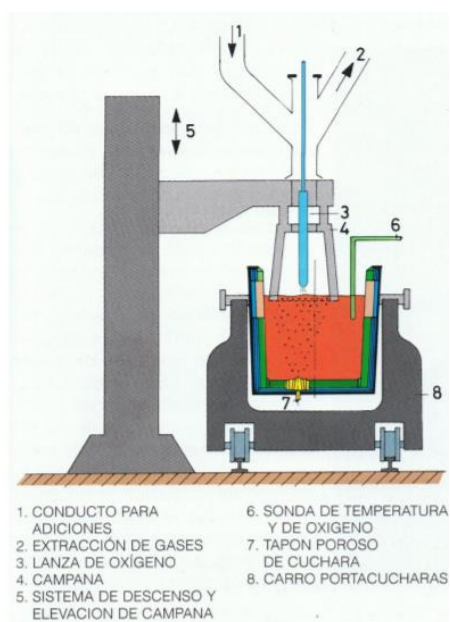


Figura 30. Esquema del proceso CAS-OB

- Inyección con alambre (Cored wire)

Es un sistema más complejo que los anteriores, de forma simplificada consiste en la adición de aluminio, calcio y ferroaleaciones principalmente a elevada velocidad mediante una envoltura o tubería de acero [5], de forma conjunta con una inyección de Argón por el tapón



poroso de la parte inferior de la cuchara. La incorporación de aluminio mediante alambre es útil para homogeneizar el baño de acero y favorecer la desoxidación, y el calcio permite modificar la morfología de las inclusiones. La adición de calcio comenzó a utilizarse con este método, debido a que el calcio tiene un punto de ebullición inferior a la temperatura a la que se encuentra el baño de acero. El sistema completo consta de una plataforma giratoria sobre la que están dispuestos los equipos de alimentación de alambre, la máquina de inyección del alambre, el brazo de sujeción para el sistema de toma de muestras, sensores de temperatura, y en muchos sistemas también cuenta con un slab de refrigeración para refrigerar el baño de acero cuando sea necesario y una lanza de inyección de Argón. La figura 31 muestra un esquema simplificado donde se muestra el proceso de inyección de aditivos mediante alambre. Existen otros sistemas de inyección menos empleados, pero que también son efectivos, entre los que se pueden destacar la inyección vehiculada de aluminio con nitrógeno o la inyección de proyectiles de aluminio y calcio a gran velocidad para que lleguen al fondo de la cuchara sin fundirse antes.

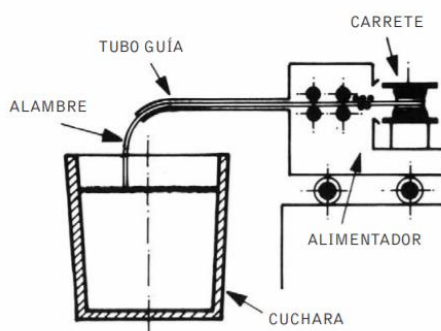


Figura 31. Esquema del proceso de inyección con alambre

- Sistemas de inyección con lanza

El sistema consiste en la inyección de elementos desulfurantes y desoxidantes en polvo junto con un gas inerte mediante una lanza



sumergida en el acero de la cuchara (figura 32). Este tratamiento consigue una excelente homogeneización y un ajuste de temperatura óptimo obteniendo una colada de acero muy limpia. Uno de los sistemas más usados que emplea este tipo de tratamiento es el sistema Thyssen-Nierderrhein (TN).

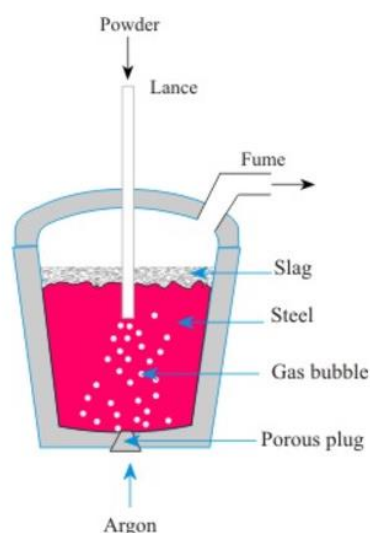


Figura 32. Esquema del proceso de inyección de aditivos en polvo mediante lanza

6.1.2.2 Tratamiento a presión atmosférica con aporte térmico

Al igual que en los tratamiento por vacío, el aporte térmico se puede conseguir mediante una inyección de oxígeno o de forma eléctrica calentando el acero mediante un arco eléctrico creado por electrodos. En este tipo de tratamientos podemos diferenciar dos sistemas principales, el tratamiento atmosférico con aporte térmico en horno cuchara y el proceso Argon Oxigen Decarburisation.

- Proceso atmosférico con aporte térmico en Horno cuchara

El tratamiento a presión atmosférica en horno cuchara con un aporte térmico adicional consiste en un proceso realizado íntegramente en el horno cuchara. El horno cuchara es calentado mediante arco eléctrico, generalmente inducido por tres electrodos, y la agitación y



homogeneización del baño de acero se puede conseguir de dos formas diferentes, a través de la inyección de Argón u otro gas inerte mediante una lanza por la zona superior, o a través de un tapón poroso en el fondo del horno cuchara, y agitación mediante inducción.

El calentamiento del horno cuchara por arco eléctrico se basa en un sistema formado por una bóveda con electrodos [5], el horno cuchara es movido generalmente mediante el carro porta-cucharas hasta la zona de calentamiento. Como se puede ver en la figura 33, el sistema no solo está formado por los electrodos que crean el arco eléctrico, también dispone de diversos equipos eléctricos, un sistema de adición de aleantes, agitación, toma de muestras, control de temperatura, inyección de aluminio. El acero procedente del horno eléctrico o del convertidor eléctrico es colado al horno cuchara, donde es sometido diferentes operaciones. Una de los procesos es el ajuste preciso de composición mediante la inyección en el baño de ferroaleaciones y otros elementos como aluminio o silicio-calcio. Además del ajuste de composición se incorpora escoria sintética para provocar la desulfuración y se somete el baño a un ajuste de temperatura mediante calentamiento por arco eléctrico. Normalmente la escoria sintética está formada por cal y espato o cal, alúmina y espato, además de desulfurar el acero, favorece la eliminación de otras inclusiones y disminuye el descenso de temperatura del baño de acero. El calentamiento comienza una vez han sido añadidos los diferentes elementos citados, después se agita el baño con la inyección de Argón para homogeneizar el baño de acero a medida que se calienta.

El sistema de calentamiento más empleado es el arco eléctrico inducido por electrodos, pero también existen más formas de provocar ese calentamiento, dos de las más destacadas son:

- Calentamiento a través de un sistema de plasma térmico, normalmente de corriente continua, este tipo de sistemas no



emplean electrodos sino antorchas de plasma y electrodos de retorno. El plasma térmico consiste en inducir descargas eléctricas en los gases haciendo que estos se ionicen con electrones libres, formando una columna de plasma eléctrico conductora con una elevada temperatura. Dicha columna de plasma se conserva activa siempre que haya paso de corriente eléctrica.

- Calentamiento mediante escoria conductora o electro escoria, este sistema está basado en un electrodo consumible y una lingotera sobre la que se encuentra el baño de acero y de escoria. El electrodo ubicado encima de la escoria induce corriente eléctrica y la ioniza, la escoria se convierte en conductora y la punta del electrodo se funde por el efecto Joule que se genera por el paso de la corriente. Al fundirse la punta del electrodo caen unas gotas de metal que se desgasifican y desulfuran al reaccionar con la escoria, después dichas gotas pasan al baño de acero. Es un sistema bastante sencillo y que provoca un calentamiento bastante efectivo provocado por el calor originado en la escoria sin necesidad de crear arco eléctrico.

Los horno cuchara más empleados en este tipo de tratamiento a presión atmosférica con calentamiento son el horno de inducción de canal y el horno GRAF (Gas Refining Arc Furnace).

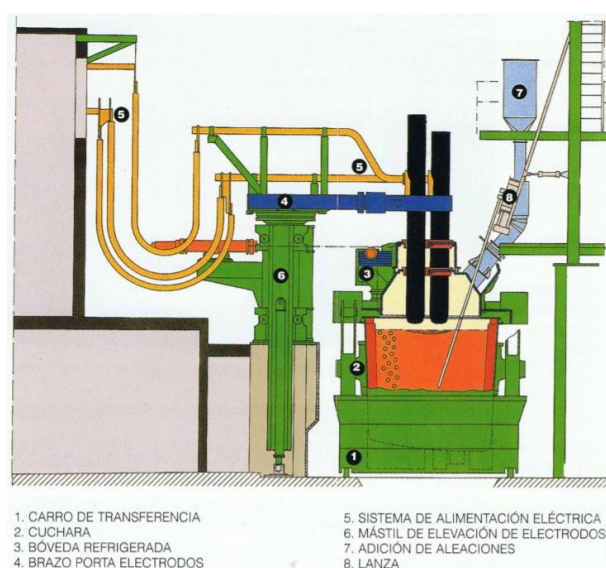


Figura 33. Esquema del horno cuchara

- Argon Oxigen Descarburisation (AOD)

El proceso AOD se basa en el empleo de un convertidor para tratar el acero procedente del horno eléctrico, en dicho convertidor se realiza una inyección simultánea de Argón y oxígeno por la parte inferior del convertidor AOD (figura 34). Es un proceso muy eficiente y su inversión no es excesivamente elevada, considerablemente más rentable que el tratamiento en un segundo horno eléctrico. Tiene varias ventajas con respecto a ese segundo tratamiento mediante horno eléctrico, por ejemplo las materia primas a emplear pueden ser de menor calidad y en consecuencia más baratas, además el contenido inicial de carbono del baño de acero puede ser mayor en el convertidor, ya que en los hornos de arco eléctrico se produce una pequeña incorporación de carbono al baño de acero proveniente de los electrodos que dificulta el proceso de afino del acero. Para reducir el carbono del baño de acero se utiliza una fase oxidante, el inconveniente es que esa desoxidación provoca también una oxidación del cromo que se pierde en la escoria y ese tratamiento secundario en horno eléctrico no es rentable. En el sistema AOD el problema de la oxidación del cromo se solventado mediante la adición



de ferrocromo duro, algo que no se puede realizar en el horno eléctrico. La explicación es sencilla, el ferrocromo duro es un elemento que tiene un alto contenido en carbono y aumentaría el contenido de carbono en el acero impidiendo obtener un acero con las especificación requeridas en lo que respecta al contenido de carbono. En los hornos eléctricos, a medida que desciende el contenido en carbono también se reduce notablemente el cromo que pasa a la escoria y se pierde. En cambio en el convertidor del proceso AOD si se puede incorporar el ferrocromo duro porque en este sistema, durante la desoxidación se realiza una inyección de Argón y oxígeno que favorece la oxidación del carbono en lugar de la del cromo. De esta manera se consigue reducir el contenido de carbono a niveles muy bajos sin provocar pérdidas de cromo. Una forma más de reducir la oxidación de cromo es la adición de elementos reductores tales como el silicio o el carburo cálcico, además si la temperatura del baño de acero se incrementa la acción de los elementos reductores se potencia y la oxidación de cromo será aún menor. Normalmente el contenido en cromo del acero resultante suele ser inferior al 18%, aproximadamente un 2% pasa a la escoria pero es recuperado posteriormente. Hay que añadir que el uso de carburo cálcico aumenta el espumado de escoria y libera monóxido de carbono, evitando la necesidad de inyectar oxígeno para formar ese CO, por lo que todo ello permite conseguir un acero más limpio con menos carbono y menos pérdidas de cromo, una colada más rápida, un volumen de escoria menor y una inversión menor debido a un menor consumo de oxígeno y escorificantes. En la relación entre oxidación de carbono y cromo también intervienen la temperatura del baño de acero y la presión parcial del monóxido de carbono. Elevando la temperatura del acero, se consigue que para un mismo contenido de carbono el contenido de cromo sea superior con una temperatura más elevada. Con la presión parcial del CO ocurre algo similar pero a la inversa, cuando se reduce la presión la pérdida de cromo es menor. Para



reducir la presión parcial del CO se puede inducir el vacío como se realiza en los procesos ASEA o RH-OB, cuya inversión es superior o simplemente inyectar un gas inerte como el Argón. La inyección de Argón provoca que la presión parcial del CO disminuye porque en la atmosfera del convertidor se incorpora otro gas, esto hace que disminuya la presión del resto de gases que ya estaban presentes, ya que, la presión total es igual al sumatorio de las presiones parciales de todos los gases presentes en dicha atmosfera. El tiempo de tratamiento mediante este proceso suele rondar los 90 minutos. El patrón de tratamiento seguido en el proceso AOD es el siguiente:

- I. Primero se realiza una inyección de oxígeno y Argón, al principio más oxígeno que Argón y en la parte final al revés.
- II. El segundo paso es incorporar ferro silicio y cal y de forma simultánea se sigue inyectando Argón, de esta forma se desoxida el acero y se recupera cromo consiguiendo obtener un baño de acero limpio y una escoria desoxidante y desulfuradora.
- III. A continuación se agita el baño mediante Argón para conseguir homogeneizar la mezcla entre el acero y la escoria formada, provocando la desulfuración.
- IV. Por último se ajusta la temperatura y composición del acero y se bascula en la cuchara de colada

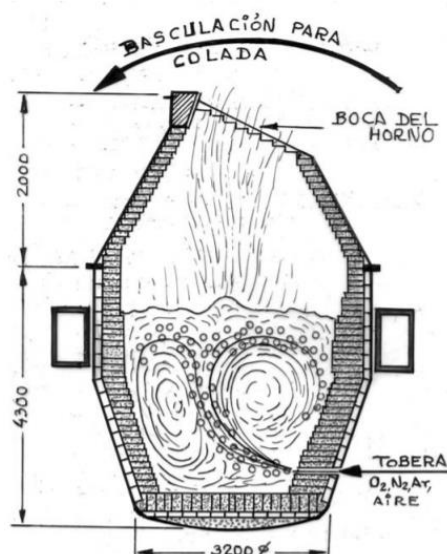


Figura 34. Esquema del convertidor AOD

7 RIESGOS ASOCIADOS A LA METALURGIA SECUNDARIA

Todas las actividades industriales tienen diversos riesgos asociados, la metalurgia secundaria no es menos y es importante analizar los principales riesgos asociados a estos procesos. La mejor forma de asegurar a los diferentes operarios y trabajadores de cualquier tipo de actividad laboral es asegurarse de que conocen todos los riesgos a los que están expuestos en su trabajo. En consecuencia es muy importante que los operarios que trabajan en el proceso productivo de las acerías conozcan los principales riesgos a los que se exponen con su labor. Los principales riesgos [19] son los siguientes:

- I. Caídas de personas
 - A nivel de suelo, debido a materiales sueltos, suelo resbaladizo, etc.
 - A distinto nivel, por trabajos en altura, en máquinas, escaleras, etc.
- II. Golpes o choques
 - Golpes contra objetos, salientes de instalaciones o máquinas.



- Golpes o cortes por manipulación de materiales cortantes, con salientes metálicos, taladros, ganchos, otras herramientas eléctricas, etc.
- Manejo de vehículos y máquinas en las instalaciones durante operaciones de fabricación o mantenimiento

III. Atrapamientos, aplastamientos y derrumbamientos

- Debido a caídas de objetos desde operaciones en altura, por ejemplo al manejar un puente grúa, caída de equipos o herramientas desde operaciones en altura durante desplazamientos por las instalaciones.
- Vuelcos de maquinaria móvil o vehículos, por choques con otro vehículo o contra algún elemento de las instalaciones.
- Aprisionamiento o arrastre por cintas transportadoras, por ejemplo como puede suceder en operaciones de mantenimiento de las propias cintas o simplemente en operaciones próximas a dichas cintas.

IV. Proyecciones o salpicaduras

- De fluidos, gases o líquidos, debido a fugas en conductos con fluidos a presión, escapes al cerrar válvulas de circulación de alta presión, etc.
- De partículas, como pueden ser las proyecciones de escoria durante la apertura de la llave de argón, de cal y grafito durante la fusión, de óxidos en la desulfuración, etc.

V. Contactos

- Contactos térmicos, contactos con superficies calientes, materiales a elevadas temperaturas, equipos o conductos con fluidos a gran temperatura, tanto en labores cotidianas de producción como labores de mantenimiento, también durante tareas de soldadura.
- Contactos eléctricos directos, este tipo de riesgo está controlado mediante protecciones diferenciales pero puede ocurrir por contacto con cables, motores, cuadros eléctricos, herramientas eléctricas, tareas de mantenimiento de fusibles, luces, etc.



- Contactos eléctricos indirectos, debido a roturas o fallos de líneas eléctricas, fallos en las protecciones diferenciales o en la puesta a tierra, labores de mantenimiento de sistema eléctrico o luces, etc.
- VI. Contactos con sustancias químicas
- Por la presencia de sustancias que se usan en el proceso de fabricación como carburos, cal, etc.
- VII. Contactos con sustancias corrosivas
- En la manipulación de aditivos para tratamiento de aguas, grasas y aceites en máquinas, productos como desulfurantes.
- VIII. Explosiones e incendios
- Por ejemplo explosiones provocadas por el contacto entre carburo cálcico y agua o emisiones de escoria durante la fase de fusión
 - Incendios derivados de la auto inflamación del acetileno que se produce cuando entran en contacto el carburo cálcico y el agua
- IX. Exposición a contaminación acústica y vibraciones
- Debido al funcionamiento de motores, bombas hidráulicas, compresores, y diversas máquinas y equipos que forman parte de la acería.
- X. Radiaciones no ionizantes
- Generadas por la emisión de rayos infrarrojos en labores de soldadura o cerca de material muy caliente, también debido a campos electromagnéticos en salas de motores, líneas de alta tensión, etc.

8 SIMULACIÓN DE METALURGIA SECUNDARIA

Esta simulación se basa en el empleo de un programa informático de simulación interactiva, proporcionado por steeluniversity a través de su página web, mediante el cual podemos introducir y modificar una serie de parámetros, como si estuviéramos a cargo de una planta de procesos de metalurgia secundaria.



7.1 Objetivo

El objetivo será conseguir un acero de unas determinadas especificaciones en función de su futura aplicación, mediante el simulador buscaremos que una cuchara entregue el acero fundido desde el convertidor LD (BOF) a la máquina de colada adecuada en cada caso con una determinada composición, temperatura e inclusiones específicas, todo esto con el menor coste posible.

7.2 Procesos y parámetros de la simulación

A continuación se van a desarrollar y explicar los principales parámetros a tener en cuenta en los diferentes procesos que se desarrollan en la simulación, como la adición de aleaciones, termodinámica y cinética de los procesos de eliminación de impurezas del acero, la agitación del baño de acero y el recalentamiento eléctrico al que será sometido el acero líquido [21].

7.2.1 Cálculo de adiciones de aleantes

Los aleantes adicionados en la cuchara sirven para ajustar la composición del acero, modificar inclusiones y desoxidar el acero debido a su reacción con el oxígeno presente en el acero, durante esa reacción se forman óxidos que pasan a la escoria. Las adiciones se pueden hacer en todos los procesos que se desarrollan en la simulación pero generalmente el mayor volumen de adiciones se lleva a cabo justo en el momento de la colada.

- Para calcular las adiciones de elementos puros (X) se utiliza la siguiente expresión:



$$m_{aditivo} = \frac{\Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{100\%} [\text{kg}]$$

Siendo: $\Delta\%X = \%X_{requerido} - \%X_{actual}$ (unidades en % en peso)

- Para calcular adiciones de elementos puros mediante ferroaleaciones (aleaciones de varios componentes) se emplea la siguiente ecuación:

$$m_{aditivo} = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} [\text{kg}]$$

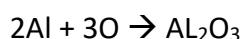
- La adición de ferroaleaciones al baño de acero afecta a la composición del acero, el aumento de un elemento en el acero se determina mediante la reordenación de la ecuación anterior:

$$\Delta\%X = \frac{m_{aditivo} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}$$

Las adiciones en la cuchara no provocan cambios de composición de forma instantánea, por ello es necesario ajustar el tiempo de agitación para dar tiempo a que los aditivos se mezclen de forma homogénea. Es importante saber que las adiciones mediante alambre o adiciones pulverizadas se disuelven más rápidamente que adiciones de partículas mayores. Además a medida que la temperatura desciende los tiempos necesarios para una mezcla óptima aumentan. Como se ha mencionado en el apartado 7.4 la adición de aleantes en la cuchara provoca un enfriamiento de 6°C por cada tonelada de elementos incorporados al baño de acero.

7.2.2 Desoxidación y cálculo de adiciones de aluminio

El aluminio es un elemento con un gran poder desoxidante y cuando es adicionado al baño de acero reacciona exotérmicamente con el oxígeno. La reacción química mediante la que se produce cuando se añade aluminio al baño de acero es la siguiente:





Como se ve en la ecuación, suponiendo estequiometria, 2 átomos de aluminio reaccionan con 3 de oxígeno, es decir, 54 unidades de masa de aluminio reaccionan con 48 unidades de masa de oxígeno. En función de esto, se puede determinar la cantidad de aluminio en unidades de porcentaje en peso necesaria para la desoxidación con la siguiente fórmula:

$$\%Al \approx \frac{54}{48} \cdot \%O$$

La adición total de aluminio necesaria será la suma del valor calculado con la expresión anterior y el porcentaje en peso de aluminio residual del acero final. Una vez determinado el porcentaje de adición de aluminio, determinaremos la cantidad a adicionar en kg mediante la expresión de adición de aleantes a través de ferroaleaciones expuesta en el apartado previo (7.2.1).

La constante de equilibrio entre el aluminio y el oxígeno viene dada por la siguiente expresión:

$$K_{Al-O} = a_{Al_2O_3} / (a_O^3 \cdot a_{Al}^2)$$

Siendo a la actividad del elemento o compuesto

De esta forma podemos determinar la actividad del oxígeno en función de la actividad del aluminio incorporado:

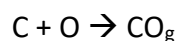
$$a_O^3 = a_{Al_2O_3} / (K_{Al-O} \cdot a_{Al}^2)$$

Como ya se explicó en el apartado 5.1, se puede verificar que la desoxidación con aluminio es más efectiva a bajas temperaturas, ya que se sabe que:

$$\log K_{Al-O} = \frac{62,78}{T(K)} - 20,5$$

7.2.3 Descarburación

En la desgasificación por vacío la eliminación de carbono en el acero se manifiesta a través de la siguiente reacción:



La constante de equilibrio de esta reacción es la siguiente:

$$K_{C-O} = p_{CO} / (a_C \cdot a_O)$$

$$\text{Siendo: } \log K_{Al-O} = \frac{1,168}{T(K)} + 2,07$$

Donde:

p la presión, expresada en atm

a la actividad

T la temperatura, expresada en °K

Es importante tener en cuenta también la cinética del proceso de descarburación para conocer la velocidad de eliminación del carbono, dicha velocidad de descarburación se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\ln \left[\frac{[\%C]_f - [\%C]_{eq}}{[\%C]_i - [\%C]_{eq}} \right] = k_c \cdot t$$

Donde:

$[\%C]_f$ es la concentración final de carbón transcurrido un tiempo t, expresado en porcentaje

$[\%C]_{eq}$ es la concentración de carbono en equilibrio, expresado en porcentaje

$[\%C]_i$ es la concentración inicial de carbono, expresado en porcentaje

k_c es la constante de la reacción de descarburación, expresada en min^{-1}

Mediante esta expresión también podemos determinar el tiempo necesario para conseguir la descarburación de un acero, simplemente hay que despejar el tiempo t, y determinar su valor en función del porcentaje de carbono final que se desee.

$$t = - \frac{1}{k_c} \cdot \ln \left[\frac{[\%C]_f - [\%C]_{eq}}{[\%C]_i - [\%C]_{eq}} \right] \text{ [min]}$$



Para conocer el porcentaje de carbono tras la descarburación simplemente despejamos en la ecuación anterior:

$$\%C_f = \%C_{eq} + (\%C_i - \%C_{eq}) \cdot \exp(-k_c \cdot t)$$

La constante de reacción de descarburación en los desgasificadores con recirculación (RH) tiene el siguiente valor:

$$k_c = \left[\frac{Q}{V_b \cdot \rho} \right] \cdot \left[\frac{q}{\frac{Q}{\rho} + q} \right] [min^{-1}]$$

Donde:

Q es la velocidad de circulación del acero líquido en kg/min

q es el coeficiente volumétrico de transferencia de masa en la descarburación en m³/min

V_b es el volumen de acero líquido en la cuchara en m³

ρ es la densidad del acero líquido en kg/ m³

Los valores que tomaremos para realizar las simulaciones van a ser los siguientes:

$$Q = 80000 \text{ kg/min}$$

$$q = 18 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$V_b = 34,7 \text{ m}^3$$

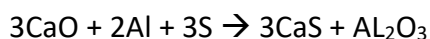
$$\rho = 7200 \text{ kg/ m}^3$$

Por lo que el valor de la constante de descarburación a utilizar en las simulaciones que sea necesario descarburar el acero líquido tendrá el siguiente valor

$$k_c = 0,164 \text{ min}^{-1}$$

7.2.4 Desulfuración

La desulfuración del acero en la cuchara se refleja a través de la siguiente reacción:



La desulfuración se consigue a través de tres procesos:

1. A través de la adición de escoria sintética desulfurante en el proceso de colada en la cuchara. Al principio de la simulación se puede añadir una escoria sintética a base de CaO, pero antes de añadir dicha escoria hay que especificar la cantidad de escoria a agregar y la composición de la misma, en función de la relación entre CaO y Al_2O_3 . A mayor cantidad de escoria incorporada mayor será el poder desulfurante pero también el coste. Respecto a la concentración de CaO en la escoria, niveles de CaO más altos permite una mayor capacidad de desulfuración pero también aumenta el riesgo de que la escoria solidifique si no se consigue mantener a una temperatura lo suficientemente elevada.

La concentración de azufre en equilibrio en una escoria se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$[\%S]_{\text{eq}} = [\%S]_i \cdot \frac{\left(\frac{1}{L_s} \cdot \frac{W_m}{W_s}\right)}{1 + \left(\frac{1}{L_s} \cdot \frac{W_m}{W_s}\right)} [\%wt]$$

Donde:

$[\%S]_i$ es la concentración inicial de azufre, expresada en porcentaje en peso

L_s es la relación de distribución del azufre, cuyo valor es $L_s = \left\{ \frac{\%S}{[\%S]} \right\}$

W_m es el peso de la escoria, expresado en kg

W_s es el peso del metal, expresado en kg

A partir de la expresión enunciada previamente se puede determinar la cantidad de escoria necesaria para conseguir una concentración específica de azufre, simplemente hay que despejar el valor de W_s e introducir como la concentración de azufre en equilibrio la concentración final de azufre deseada:



$$W_s = \left(\frac{Wm}{Ls} \right) \cdot \left(\frac{[\%S]i - [\%S]f}{[\%S]f} \right) [kg]$$

2. Mediante desoxidación con aluminio siempre que la cantidad de oxígeno en el acero sea baja, ya que en caso contrario el aluminio tiene preferencia por el oxígeno y reaccionaría con él. Consiste en el mismo proceso descrito en el apartado 7.6.2.
3. Mediante una fuerte agitación del acero en el tanque desgasificador para conseguir una buena mezcla de metal y escoria. A través de la inyección de Argón de forma simultánea con el vacío generado en el tanque desgasificador, se consigue una fuerte agitación que permitirá lograr un desulfuración rápida y eficaz. La constante de reacción de desulfuración (k_s), expresada en min^{-1} , depende de la densidad de potencia de agitación (ϵ). Está comprobado que para valores de ϵ inferiores a 70 W/t la constante de reacción de desulfuración aumenta lentamente, en cambio cuando la densidad de potencia de agitación se eleva por encima de los 70 vatios por tonelada el valor de k_s se incrementa de forma mucho más rápida.

Para valores de ϵ inferiores a 70 W/t, la expresión de k_s a emplear será:

$$k_s = 0,031 \cdot \epsilon^{0,25} [min^{-1}]$$

Para valores de ϵ superiores a 70 W/t, usaremos la siguiente expresión de k_s :

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \cdot \epsilon^{2,1} [min^{-1}]$$

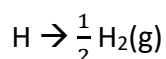
Si se desea determinar el tiempo necesario de desulfuración para conseguir un acero con una determinada concentración de azufre final aplicaremos la siguiente fórmula

$$t = \frac{\ln \left\{ \frac{[\%S]f}{[\%S]i} \left(1 + \frac{1}{Ls} \cdot \left(\frac{Wm}{Ws} \right) \right) - \frac{1}{Ls} \cdot \left(\frac{Wm}{Ws} \right) \right\}}{-k_s \cdot \left[1 + \frac{1}{Ls} \cdot \left(\frac{Wm}{Ws} \right) \right]} [min]$$



7.2.5 Eliminación de hidrogeno

La reacción que se produce en la eliminación del hidrogeno disuelto en el acero líquido se basa en la formación de hidrogeno biatómico gaseoso, y es la siguiente:



A menor presión menor es la concentración de hidrogeno disuelto en equilibrio, y esto está demostrado ya que sabemos que:

$$\text{Log} \frac{[ppm H]}{\sqrt{p_{H_2}}} = -\frac{1900}{T} + 2,423$$

Los tanques de desgasificación actuales permiten alcanzar presiones muy bajas, de hasta 0,001 atm, y esto permite que se puedan conseguir aceros con niveles de hidrogeno muy reducidos, incluso inferiores a 1ppm. Pero es importante añadir que esas presiones tan bajas solo se logran en la parte superficial del baño de acero, sometiéndolo al vacío, pero en la parte baja de la cuchara las presiones son significativamente superiores, alrededor de 5 atm. Por lo que para que se consiga una buena eliminación de hidrogeno la agitación debe ser eficaz y la velocidad de circulación en el metal debe ser elevada. La cinética de eliminación del Hidrógeno se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\ln \left(\frac{[H]_f - [H]_{eq}}{[H]_i - [H]_{eq}} \right) = -k_H \cdot t$$

Donde:

$[H]_f$ es la concentración final de hidrogeno, definida en ppm de masa

$[H]_i$ es la concentración inicial de hidrogeno, en ppm de masa

$[H]_{eq}$ es la concentración de hidrogeno en el equilibrio, expresada en ppm de masa

k_H es la constante de reacción de eliminación de hidrogeno, cuyas unidades son min^{-1}



- En el tanque desgasificador el valor de k_H depende de la velocidad del flujo de Argón, en la simulación emplearemos la siguiente expresión para determinar k_H :

$$k_H = 0,0576 \cdot V + 0,02 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Siendo V la velocidad del flujo de Argón en $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{min}$

- En la desgasificación por recirculación (RH) emplearemos un valor de $k_H = 0,13$

Una vez conocida la expresión que rige la cinética de la eliminación del hidrogeno ya podemos determinar el tiempo necesario para conseguir un acero con una determinada concentración de hidrogeno deseada o la concentración final de hidrogeno que tendrá un acero después de haber sido tratado un tiempo t indicado.

7.2.6 Agitación en la cuchara

La agitación del baño de acero de la cuchara es de vital importancia para conseguir un ajuste en la composición del acero óptimo y una homogeneización en la temperatura del baño. Esta agitación se consigue a través de la inyección de Argón, y para conseguir una agitación eficaz es muy importante determinar la densidad de potencia de agitación (ϵ) correcta mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = 14,23 \cdot \left(\frac{V \cdot T}{M}\right) \cdot \log\left(\frac{1+H}{1,48 \cdot P_0}\right) \text{ [W/t]}$$

Donde:

V es la velocidad del flujo de Argón, expresada en $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{min}$

T es la temperatura del baño de acero en $^\circ\text{K}$

M es la masa de acero en toneladas

H es la profundidad a la que se realiza la inyección de Argón, expresada en metros



P_0 es la presión de gas en la superficie del baño, definida en atm ($P_0=1$ atm si el baño de acero está en contacto con el aire)

A la hora de realizar las simulaciones, desconocemos datos como H o P_0 , por lo que para realizar las simulaciones simplemente controlaremos la agitación de forma intuitiva mediante el regulador de agitación que tiene una escala de 0 a 1.0 como se puede ver en la figura 35. Aunque hay que decir que la agitación no es un parámetro de vital importancia en la simulación, en la realidad si lo es y debe ser controlado más minuciosamente.



Figura 35. Pantalla de control de la estación de lavado con argón en el simulador

7.2.7 Recalentamiento eléctrico

El recalentamiento eléctrico es un tipo de calentamiento que se puede inducir en el baño eléctrico a través de un arco eléctrico provocado por electrodos. La expresión que permite conocer la energía (E) necesaria para provocar un aumento de temperatura (ΔT) en el baño de acero es la siguiente:

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T [kW \cdot h]$$

Donde:



m es la masa del baño de acero, definida en toneladas

C_p es la capacidad térmica específica a presión constante o calor específico, expresado en $\text{kw}\cdot\text{h}/^\circ\text{C}\cdot\text{t}$

El aumento de temperatura teórico (ΔT) se puede calcular ahora mediante la ecuación definida previamente y a partir de esa expresión obtener la fórmula para determinar la velocidad de calentamiento:

$$\Delta T = \frac{E}{m \cdot C_p} [^\circ\text{C}]$$

La velocidad de calentamiento teórica será el aumento de temperatura teórico entre el tiempo, es decir:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \left(\frac{dT}{dt} \right) = \frac{dE}{dT} \cdot \frac{1}{m \cdot C_p} = \frac{P}{m \cdot C_p} [^\circ\text{C}/\text{h}]$$

Donde:

P es la energía calorífica, expresada en kW

Hay que tener en cuenta que el calentamiento eléctrico no es un proceso efectivo al cien por cien, es decir, siempre habrá ciertas pérdidas de calor. El rendimiento de los electrodos se define mediante la relación entre el calentamiento real provocado y el calentamiento teórico que debería de producirse:

$$\eta = \frac{\Delta T_{\text{real}}}{\Delta T_{\text{teórico}}}$$

Y el calentamiento real lo podemos determinar sustituyendo en la fórmula del rendimiento el aumento de temperatura teórico, que se puede obtener a partir de la expresión de la velocidad teórica de calentamiento enunciada previamente.

Por tanto, siendo el calentamiento teórico ($\Delta T_{\text{teórico}}$):

$$\Delta T_{\text{teórico}} = \Delta t \cdot \frac{P}{m \cdot C_p} [^\circ\text{C}]$$



El incremento de temperatura real será el siguiente:

$$\Delta T_{real} = \frac{\Delta t \cdot P}{m \cdot C_p} \cdot \eta \text{ [}^\circ\text{C]}$$

En definitiva, para producir un calentamiento (ΔT_{real}) deseado, el tiempo necesario para conseguir este calentamiento será:

$$\Delta t = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T_{real}}{\eta \cdot P} \text{ [h]}$$

Dónde, como ya se ha ido detallando a lo largo de este apartado, las unidades de cada parámetro involucrado en la ecuación son las siguientes:

m = masa del baño de acero, expresada en toneladas

C_p = calor específico, expresado en $\text{kw}\cdot\text{h}/^\circ\text{C}\cdot\text{t}$

ΔT_{real} = incremento de temperatura real, expresado en $^\circ\text{C}$

η = rendimiento de los electrodos, expresado en tanto por uno

P = energía calorífica, expresada en kw

Las expresiones anteriores son empleadas en la práctica real de la metalurgia secundaria, pero en el simulador el recalentamiento eléctrico en el horno cuchara se controla mediante un regulador que permite variar la intensidad del calentamiento en un rango de 1 a 20 como se puede ver en la figura 36. En función de la temperatura final requerida para cada grado de acero a simular se ajusta la temperatura del baño mediante dicho regulador de una forma intuitiva, sin necesidad de realizar cálculos.



Figure 36. Pantalla de control del horno cuchara del simulador

7.2.8 Limpieza del acero

La limpieza del acero se refiere a la presencia de inclusiones no metálicas en el acero final, cuanto más limpio sea el acero menor presencia de inclusiones tendrá dicho acero. Para aplicaciones como puede ser la fabricación de tuberías para distribución de gas se necesita un grado de acero de gran limpieza, por lo que el contenido de inclusiones de dicho acero debe ser mínimo para evitar que la resistencia y tenacidad del acero se resienta y puedan producirse fracturas en las tuberías. Durante la desoxidación del acero líquido mediante la adición de aluminio al baño, se produce la formación de partículas de óxido de aluminio (Al_2O_3), si no se consigue una buena agitación del baño de acero en la cuchara, estas partículas se quedarán en el acero y no llegarán a la escoria donde deberían quedar atrapadas. Como se ha mencionado antes, esto puede ser crítico en la fabricación de acero cuya futura aplicación requiere unas exigencias muy altas, debido a esto es importante provocar una agitación eficiente de la cuchara durante un intervalo de tiempo adecuado. Tanto la cantidad como el tamaño de las partículas de Al_2O_3 que se forman durante la desoxidación dependen principalmente de la cantidad de oxígeno disuelto presente en el acero. Cuando



la cantidad de oxígeno disuelto en el baño de acero es elevada las partículas de óxido de aluminio formadas son mayores y estas partículas flotan hacia la escoria a una velocidad superior. En cambio a menores contenidos de oxígeno disuelto, menores dimensiones tendrán las partículas de Al_2O_3 y flotarán hacia la escoria más lentamente, requiriendo mucho más tiempo para conseguir que sean atrapadas por la escoria. El papel de la agitación de la cuchara también es significativo, una buena agitación permite reducir el nivel de inclusiones en el acero de forma mucho más rápida que sin agitación, por lo que además de tener en cuenta el oxígeno disuelto y las adiciones de aluminio, es otro parámetro importante en lo que a limpieza del acero se refiere.

La velocidad de flotación (u) de partículas esféricas está definida mediante la ley de Stokes, y dicha velocidad de flotación es proporcional al cuadrado del diámetro de las partículas esféricas, como queda bien reflejado en la siguiente ecuación:

$$u = \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta} [m/s]$$

Donde:

g es la aceleración de la gravedad, cuyo valor es $9,82 \text{ m/s}^2$

$\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre las partículas y el acero líquido, expresada en kg/m^3

η es la viscosidad del acero líquido a $1600 \text{ }^\circ\text{C}$, de valor $\eta = 6,1 \times 10^{-3} \text{ N/s}\cdot\text{m}$

Este parámetro no se puede controlar durante la simulación, ya que el simulador no ofrece datos acerca del diámetro de partículas o su densidad, por lo que no es posible determinarlo en las diferentes simulaciones que se llevarán a cabo.

Si durante la etapa de desoxidación la cantidad de aluminio adicionada es óptima, no será necesario realizar más adiciones más adelante, algo que no es recomendable para la eficiencia del proceso. La explicación es simple, si necesitamos realizar más adiciones de aluminio, el contenido de oxígeno disuelto en el baño de acero será cada vez menor y por tanto las partículas de óxido de aluminio que se generarán serán más pequeñas. En consecuencia, lo que se



conseguirá ser una peor eliminación de las partículas de Al_2O_3 y un mayor tiempo requerido para dicha eliminación.

7.3 Definición de los grados de acero requeridos

Antes de realizar la simulación, tenemos que definir los grados de acero que queremos obtener, es decir, en función de la aplicación que se le va dar al acero deberá tener unas determinadas características. Para conseguir el grado de acero requerido hay que aplicar unos procesos de metalurgia secundaria y variar ciertos parámetros en dichos procesos como puede ser la temperatura, el tiempo, las adiciones, etc.

Para esta simulación vamos a tener cuatro grados de acero diferentes, cada uno de ellos requiere un procesamiento distinto, por ejemplo un acero para la construcción tiene un grado menos exigente que un acero de ultra bajo carbono con TiNb, usado en la industria automotriz, y que necesita un procesamiento más exigente con el objetivo de eliminar el carbono presente en el acero. Estos son dos tipos de grados de acero que buscaremos obtener en la simulación, otro es un acero para tuberías de distribución de gas, este grado de acero es muy exigente también debido a que se debe reducir lo máximo posible los niveles de azufre e hidrógeno. El último acero a obtener será para construcción mecánica termotratable, de medio carbono, al CrMo es un ejemplo de un grado más aleado.

La figura 37 muestra un gráfico comparativo de las composiciones de los cuatro grados de acero a obtener:

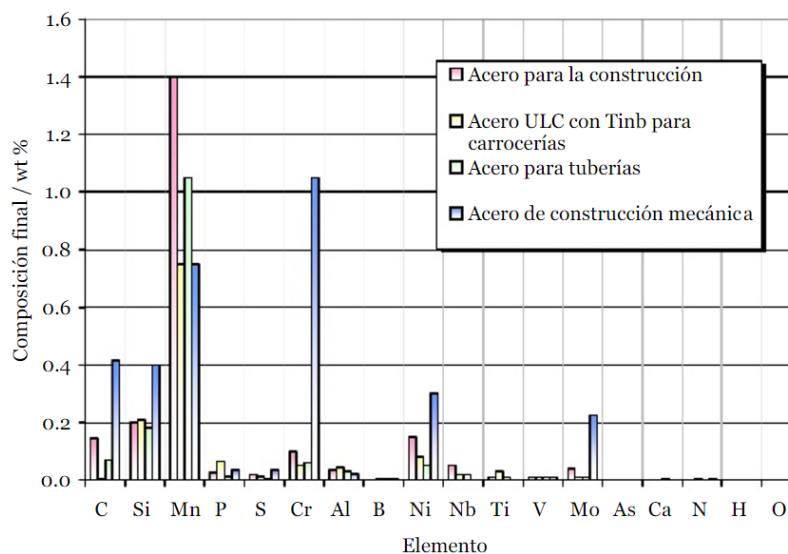


Figura 37. Comparación de la composición de cada elemento entre los cuatro grados de acero objeto de simulación

A continuación se exponen las propiedades mecánicas y la composición típica de cada uno de los aceros.

7.3.1 Acero para vigas de construcción de aplicación general

El acero utilizado para vigas de construcción es un acero hipoeutectoide con un porcentaje de carbono de 15% aproximadamente formado por ferrita y perlita (~15%), con un tamaño de grano de unos 6,6 μm . Este tipo de acero requiere un procesamiento bastante simple, y la principal dificultad que presentará será garantizar unos niveles correctos de adiciones de aleantes. En la figura 38 podemos observar la microestructura típica de este tipo de aceros, el constituyente blanco es la ferrita, y el negro la perlita.



Figura 38. Microestructura acero hipoeutectoide 0,15%C. Aumento de 200x

A continuación, en las tablas 1 y 2, se muestra la composición típica de este tipo de aceros y las principales propiedades mecánicas que deben de tener.

Tabla 1. Composición típica de los aceros para vigas de construcción general

COMPOSICIÓN	
%C	0,145
%SI	0,2
%MN	1,4
%P	< 0,025
%S	< 0,02
%CR	< 0,1
%AL	0,035
%B	< 0,0005
%NI	< 0,15
%NB	0,05
%TI	< 0,01
%V	< 0,01
%MO	< 0,04
%N	< 0,005
%H	< 0,0005
%O	< 0,001

Tabla 2. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para vigas de construcción general

PROPIEDADES MECÁNICAS	
LÍMITE ELÁSTICO (YIELD STRENGTH)	429 MPa



RESISTENCIA A LA ROTURA POR TRACCIÓN (ULTIMATE TENSILE STRENGTH)	537 MPa
ELONGACIÓN	25

7.3.2 Acero de ultra bajo carbono (ULC) con TiNb para chapas de la industria automotriz

Los aceros de ultra bajo carbono con TiNb empleados para piezas de carrocería de automóviles tienen un contenido en carbono inferior al 0,0035% con la finalidad de optimizar la conformabilidad. Es importante conocer este dato ya que habrá que priorizar la selección de materias primas con bajos contenidos en carbono, ya que ese mismo carbono después deberá ser eliminado mediante los procesos de metalurgia secundaria. Las tablas 3 y 4 muestran la composición típica y las propiedades mecánicas adecuadas para este grado de acero.

Tabla 3. Composición típica de los aceros de ultra bajo carbono con TiNb

COMPOSICIÓN	
%C	0,003
%SI	0,21
%MN	0,75
%P	0,065
%S	< 0,012
%CR	< 0,05
%AL	0,045
%B	0,003
%NI	< 0,08
%NB	0,02
%TI	0,03
%MO	< 0,01
%AS	< 0,001
%N	< 0,004
%H	< 0,0005
%O	< 0,0005



Tabla 4. Propiedades mecánicas típicas de los aceros de ultra bajo carbono con TiNb

PROPIEDADES MECÁNICAS	
LÍMITE ELÁSTICO (YIELD STRENGTH)	180 - 280 MPa
RESISTENCIA A LA ROTURA POR TRACCIÓN (ULTIMATE TENSILE STRENGTH)	310 - 375 MPa
ELONGACIÓN	34-40
VALOR N PROMEDIO	0,16 – 0,2

7.3.3 Acero para tubería de distribución de gas

El acero usado para la distribución de gas es un grado de acero bastante exigente, esto se debe a que este tipo de acero requiere la combinación de una alta resistencia junto con una elevada tenacidad a la fractura y una buena soldabilidad. Para conseguir este grado de acero se debe obtener un acero muy limpio, o lo que es lo mismo que su nivel de impurezas sea muy bajo, es decir, el contenido de azufre, fósforo, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y la presencia de inclusiones deben ser considerablemente reducidos. Las tuberías con mayor capacidad necesitan un límite de fluencia superior, por ejemplo en extracciones a grandes profundidades se requieren tuberías de paredes gruesas para soportar el pandeo, y para tuberías a usar en condiciones de baja temperatura se requiere una tenacidad especial. Las tuberías dedicadas al transporte de ácidos deben ser de un acero resistente a la figuración inducida por el hidrógeno y también a la corrosión. En las tablas 5 y 6 se puede ver la composición necesaria y las propiedades mecánicas típicas de los aceros para fabricación de tuberías de distribución de gas.

Tabla 5. Composición típica de los aceros para tuberías de distribución de gas

COMPOSICIÓN	
%C	0,07
%SI	0,18
%MN	1,05
%P	< 0,012
%S	< 0,003



%CR	< 0,06
%AL	0,03
%B	< 0,005
%NI	< 0,05
%NB	0,015
%TI	< 0,01
%V	< 0,01
%MO	< 0,01
%CA	< 0,005
%N	< 0,0045
%H	< 0,0002
%O	< 0,0007

Tabla 6. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para tuberías de distribución de gas

PROPIEDADES MECÁNICAS	
LÍMITE ELÁSTICO (YIELD STRENGTH)	448 MPa
RESISTENCIA A TRACCIÓN (TENSILE STRENGTH)	530 MPa
ELONGACIÓN	23,5

7.3.4 Acero para construcción mecánica

El acero para construcción mecánica se trata de un tipo de acero termo tratable con un bajo grado de aleación, con significativas adiciones de molibdeno y cromo. Este tipo de aceros requieren una elevada resistencia, unida a una buena tenacidad, y un bajo contenido de hidrogeno, cuya aplicación será el uso en la construcción de componentes como motores, transmisiones, herramientas, etc.

Las tablas 7 y 8 muestran la composición típica y las propiedades mecánicas características de este grado de acero.

Tabla 7. Composición típica de los aceros para construcción mecánica

COMPOSICIÓN	
%C	0,415
%SI	0,4
%MN	0,75
%P	0,035



%S	0,035
%CR	1,05
%AL	0,0225
%B	0,005
%NI	0,3
%NB	0
%TI	0
%V	0,01
%MO	0,225
%AS	0
%CA	0
%N	0,005
%H	0,0002
%O	0,0005

Tabla 8. Propiedades mecánicas típicas de los aceros para construcción mecánica

PROPIEDADES MECÁNICAS	
LÍMITE ELÁSTICO (YIELD STRENGTH)	1250 MPa
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (ULTIMATE TENSILE STRENGTH)	1450 MPa
ELONGACIÓN	2

7.4 Descripción de la planta de simulación

La planta de acería del simulador consta de los siguientes equipos y sistemas de desgasificación:

- Dos convertidores LD (BOF), tan solo uno se encuentra activo.
- Dos puentes grúa para izar y cambiar la cuchara de carro porta-cucharas, el puente grúa 1 permite llevar la cuchara al sistema de desgasificación por recirculación, al tanque desgasificador, al sistema CAS-OB y al horno cuchara de arco eléctrico. El puente grúa 2 permite llevar la cuchara hasta las tres máquinas de colada diferentes.
- Un sistema de agitación o estación de lavado con Argón (basado en la inyección de Argón)



- Sistema RH o recirculating degasser con calentamiento por inyección de oxígeno y aluminio (proceso de desgasificación en vacío con recirculación para eliminar C, O, H y N, este último si los niveles de O y S son bajos)
- Tanque desgasificador o Tank degasser (proceso de desgasificación en vacío sin recirculación para eliminar C, O, H y también N si los niveles de O y A son bajos)
- Proceso CAS-OB con calentamiento por inyección de oxígeno y aluminio (proceso de afino con adición de aleantes en atmosfera inerte y calentamiento mediante inyección de aluminio y oxígeno)
- Horno cuchara de arco eléctrico (ladle furnace) para calentar el baño de acero mediante arco eléctrico inducido por electrodos
- Tres máquinas de colada, una máquina de colada de tochos, una de planchones y una de palanquillas.

Como se puede ver en la figura 39 la simulación comienza con la basculación del acero desde el convertidor LD a la cuchara. La cuchara está montada sobre un carro porta cucharas que lleva la cuchara hasta el sistema de agitación, donde se inyecta Argón en la cuchara para agitar y homogeneizar el baño de acero para conseguir un ajuste de composición y temperatura adecuados. A través de un puente grúa se iza la cuchara y se cambia de carro para llevarla a alguno de los sistemas de tratamiento, el sistema RH, el proceso CAS-OB o el horno cuchara (ladle furnace) para calentar el baño de acero. Estos sistemas en un principio se encuentran por encima de los rieles sobre los que se mueve el carro porta-cuchara para permitir colocar la cuchara debajo de los mismos. Respecto a parámetros de simulación como la velocidad de simulación, esta se mantendrá constante en una velocidad de 8x durante la simulación.

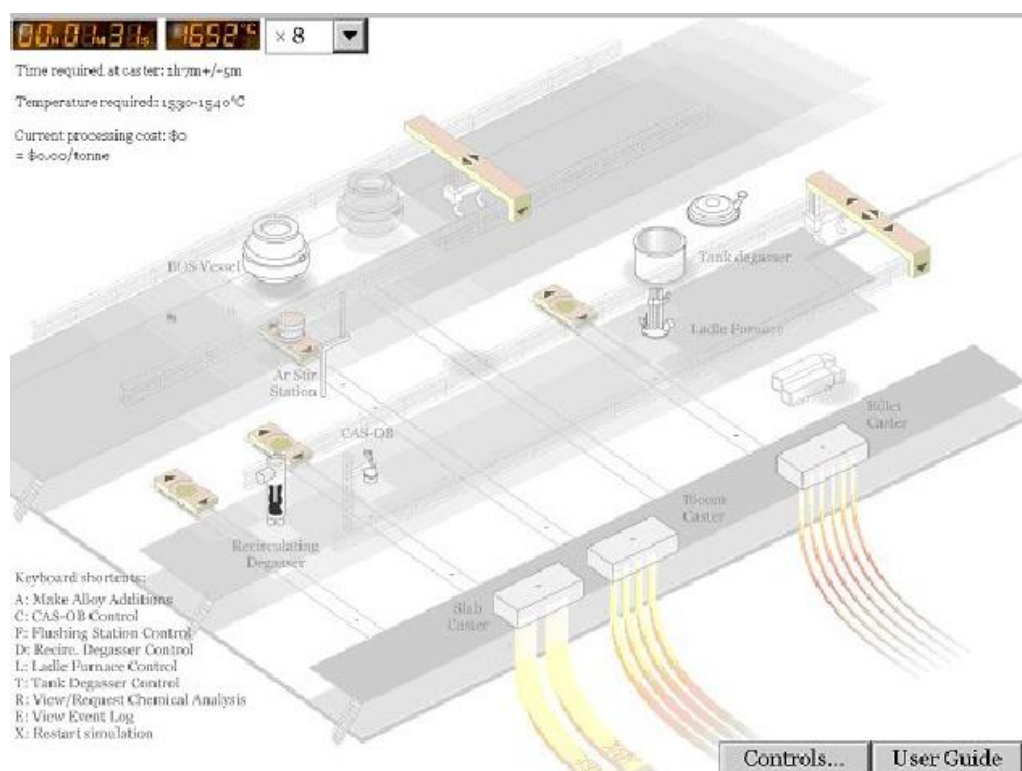


Figura 39. Planta de simulación de metalurgia secundaria

7.5 Planificación de la secuencia

Antes de comenzar la simulación es recomendable realizar una planificación para que la simulación se ejecute de forma adecuada a fin de conseguir los resultados deseados. Parámetros como el tiempo de tratamiento hasta que el acero líquido llega a la máquina de colada, la composición del acero, y la temperatura del baño de acero son de vital importancia y deben ser controlados minuciosamente durante la simulación para obtener los grados de acero deseados. Previamente al inicio de la simulación, el simulador nos indica el intervalo de tiempo en el cual debe llevarse a cabo el tratamiento del acero líquido para la obtención del grado de acero deseado. Es importante realizar el tratamiento dentro de ese intervalo porque si no el acero obtenido no cumpliría los requisitos, ya sea por un ajuste de



composición incorrecto, una desgasificación deficiente o la solidificación del acero antes de llegar a la máquina de colada.

Lo primero que hay que hacer es comparar la temperatura y composición inicial de la colada con el valor de esos mismos parámetros requerido por la máquina de colada. Para realizar una correcta simulación y conseguir los grados de acero deseados se deben determinar qué tipos de elementos hay que agregar para lograr la composición final requerida y con un coste lo más reducido posible. Además de los elementos a añadir es importante definir la cantidad a adicionar, elegir el momento ideal para la adición, así como conocer cómo afectará dicha adición de cada elemento al resto de elementos incorporados, a la temperatura del baño de acero y al nivel de impurezas del acero. Los procesos donde se llevarán a cabo las adiciones serán en el horno cuchara de arco eléctrico (ladle furnace) y el sistema CAS-OB, aunque también se pueden realizar adiciones en el momento de colada del convertidor a la cuchara.

En la tabla 9 se muestran los aditivos disponibles en el simulador, con su composición, necesaria a la hora de calcular las cantidades de aditivo a incorporar al baño de acero, y coste, indispensable para llevar un control del gasto asociado al tratamiento de metalurgia secundaria. En la tabla 10 se pueden ver las tasas de recuperación promedio para cada aditivo, la tasa de recuperación también es necesaria para determinar la cantidad de aditivo a añadir y está relacionada con el sistema donde se lleva a cabo dicha adición.

Tabla 9. Coste y composición de los aditivos del simulador

ADITIVO	Composición	Coste
RECARBURANTE	98% C + Fe bal.	280\$
FERROMANGANESO DE ALTO CARBONO	76,5% Mn, 6,7%C, 1%Si, 0,03%S, 0,3%P + Fe bal.	490\$
FERROMANGANESO DE BAJO CARBONO	81,5% Mn, 0,85%C, 0,5%Si, 0,1%S, 0,25%P + Fe bal.	840\$
FERROMANGANESO DE ALTA PUREZA	49%Mn + Fe bal.	1820\$



SILICO MANGANESO	60%Mn, 30%Si, 0,5%C, 0,08%P, 0,08%S + Fe bal.	560\$
FERROSILICIO 75	75%Si, 1,5%Al, 0,15%C, 0,5%Mn, 0,2%Ca + Fe bal.	770\$
FERROSILICIO 75, ALTA PUREZA	75%Si, 0,06%Al, 0,2%Mn, 0,02%C + Fe bal.	840\$
FERRO SILICIO 45	45%Si, 2%Al, 0,2%C, 1%Mn, 0,5%Cr + Fe bal.	630\$
ALAMBRE DE ALUMINIO	98%Al + Fe bal.	2100\$
GRANALLAS DE ALUMINIO	98%Al + Fe bal.	1400\$
FERROBORO	20%B, 3%Si, 0,2%P + Fe bal.	3780\$
FERROCROMO	66,5%Cr, 6,4%C + Fe bal.	1260\$
FERROMOLIBDENO	70%Mo + Fe bal.	16800\$
FERRONIPIO	63%Nb, 2%Al, 2%Si, 2%Ti, 0,2%C, 0,2%S, 0,2%P + Fe bal.	9800\$
FERROVANADIO	50%V + Fe bal.	8400\$
FERROFÓSFORO	26%P, 1,5%Si + Fe bal.	630\$
FERROSULFURO	28%S + Fe bal.	700\$
NÍQUEL	99%Ni + Fe bal.	7000\$
TITANIO	99% Ti + Fe bal.	2800\$
SILICIO DE CALCIO EN POLVO	50%Ca, 50% Si	1218\$
SILICIO DE CALCIO EN ALAMBRE	50%Ca, 50% Si	1540\$

Tabla 10. Tasas de recuperación promedio para cada aditivo en los diferentes sistemas de tratamiento de la simulación

ADITIVO	TASA DE RECUPERACIÓN PROMEDIO EN EL DESGASIFICADOR, HORNO CUCHARA Y CAS-OB	TASA DE RECUPERACIÓN PROMEDIO EN EL CONVERTIDOR Y ESTACIÓN DE LAVADO
CARBONO	95%	66%
MANGANESO	95%	66%
SILICIO	98%	69%
AZUFRE	80%	56%
FÓSFORO	98%	69%



CROMO	99%	69%
ALUMINIO	90%	63%
BORO	100%	70%
NÍQUEL	100%	70%
NIOBIO	100%	70%
TITANIO	90%	63%
VANADIO	100%	70%
MOLIBDENO	100%	70%
ARSÉNICO	100%	70%
CALCIO	15%	10%
OXÍGENO	100%	70%
NITRÓGENO	40%	28%
HIDRÓGENO	100%	70%
HIERRO	100%	70%

Otro punto de vital importancia es saber qué tipos de procesos son los mejores para eliminar los diferentes elementos perjudiciales para la calidad del acero. En definitiva en que procesos se consigue una eliminación más eficiente del hidrogeno, nitrógeno, oxígeno, carbono, fósforo y azufre contenidos en el acero, así como las principales variables en cada uno de esos procesos y como afectan a la composición del acero y su temperatura.

La eliminación de gases perjudiciales para el acero se realiza mediante los sistemas de desgasificación, los que están presentes en el simulador son el tanque desgasificador y el sistema de desgasificación por recirculación (RH). Aunque también la estación de lavado por argón, el sistema CAS-OB y el horno cuchara favorecen la eliminación de ciertos elementos mediante las adiciones, agitación y el calentamiento que producen.

La temperatura del acero es algo muy a tener en cuenta, el acero líquido debe llegar a la máquina de colada con una temperatura determinada, y debido a esto es fundamental saber cómo afectan los diferentes procesos de tratamiento del acero a la temperatura del mismo. En condiciones normales, durante detenciones normales de la cuchara y el transporte de la misma, el acero se enfría con un ratio aproximado de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. La agitación del acero en la cuchara provoca un enfriamiento en el baño de acero de $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ aproximadamente, la adición de aleantes también provoca un enfriamiento



del acero, por cada tonelada de aleantes añadidos el acero, este se enfría unos 6°C. No todos los procesos provocan un enfriamiento del baño de acero, por ejemplo, la inyección de aluminio genera una reacción muy exotérmica con el oxígeno contenido en el acero. El aluminio también se puede inyectar junto con oxígeno como ocurre en el proceso CAS-OB, o en la desgasificación con recirculación (RH), por cada 100 kg de aluminio añadido se considera que el aumento de temperatura en el acero es de 12°C. En el horno-cuchara también se produce un calentamiento del baño de acero a través del arco eléctrico inducido por electrodos, el ratio de calentamiento a máxima potencia se valora en 3°C/min. Y por último, durante la colada, el baño de acero se enfría alrededor de 60°. Simplemente conociendo los tiempos en cada proceso, desde que el acero se bascula del convertidor a la cuchara, hasta la colada del acero líquido, se puede determinar los cambios de temperatura a los que es sometido el baño de acero.

Es importante controlar el tiempo de tratamiento en el simulador para evitar que la temperatura del acero se reduzca por debajo del valor de la temperatura liquidus del acero, en la cual el acero comenzaría a solidificarse, esta temperatura depende fundamentalmente de la composición del acero. En este trabajo vamos a realizar dos simulaciones para cada grado de acero, modificando ciertos parámetros y secuencias de la simulación para que se pueda observar cómo estas modificaciones influyen en el tratamiento de metalurgia secundaria de cada grado de acero. De esta forma se verá que todo debe ser controlado minuciosamente para conseguir el grado de acero requerido en cada caso.

En el siguiente apartado del trabajo se expondrán las simulaciones para cada grado de acero. Para cada grado de acero se realizará una primera simulación con los valores teóricos de los principales parámetros que influyen en la simulación, estos valores se irán determinando a lo largo de la primera simulación. Si con los valores teóricos se consiguen unos buenos resultados se dará por buena la primera simulación. Si por el contrario tras esta primera



simulación el grado de acero obtenido no cumple con los requerimientos previos se analizarán los resultados de la simulación para encontrar posibles fallos y abordar una solución para conseguir el acero exigido, siempre con el menor coste posible. Una vez obtenido el grado de acero requerido se analizarán los datos obtenidos tras la simulación y la composición final para comprobar si es posible reducir aún más el coste sin perjudicar las propiedades del acero líquido.

7.6 Simulación de los diferentes grados de acero

7.6.1 Simulación del acero para vigas de construcción general

El grado de acero para vigas de construcción general es el grado más simple, solo requiere pequeñas adiciones de aleaciones y la eliminación de oxígeno disuelto en el acero.

El simulador nos ofrece una pantalla con un resumen de datos al principio de la simulación, esta pantalla nos ofrece información acerca de ciertos parámetros como la masa de acero en la cuchara, el nivel de inclusión requerido, la temperatura inicial de la colada y la máquina de colada requerida para el grado de acero, y la composición del baño de acero.

La pantalla con el resumen de datos para la primera simulación de este grado de acero se puede ver en la imagen 40.



Grado elegido Vigas de acero para la construcción de aplicación general Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 100000kg Nivel de inclusión requerido: Moderado La cuchara es requerida en Máquina de colada de tochos	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 4 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1650°C Temperatura final en máquina de colada: 1530-1540°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th></th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.0500</td><td>0.0700</td><td>✘</td><td>0.0600</td><td>0.0800</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0000</td><td>0.1800</td><td>✘</td><td>0.1300</td><td>0.2300</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1200</td><td>1.0500</td><td>✘</td><td>1.0000</td><td>1.1000</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0070</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0080</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0080</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0030</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0600</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>0.0300</td><td>✘</td><td>0.0250</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0500</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>0.0150</td><td>✘</td><td>0.0120</td><td>0.0180</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.0010</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0030</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0045</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0004</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0002</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0400</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0007</td></tr></tbody></table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~0.0500	0.0700	✘	0.0600	0.0800	Si	~0.0000	0.1800	✘	0.1300	0.2300	Mn	~0.1200	1.0500	✘	1.0000	1.1000	P	~0.0070	-	✔	-	0.0080	S	~0.0080	-	✘	-	0.0030	Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0600	Al	~0.0000	0.0300	✘	0.0250	0.0350	B	~0.0001	-	✔	-	0.0050	Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0500	Nb	~0.0000	0.0150	✘	0.0120	0.0180	Ti	~0.0000	-	✔	-	0.0100	V	~0.0000	-	✔	-	0.0100	Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100	Ca	~0.0000	-	✘	0.0010	0.0050	N	~0.0030	-	✔	-	0.0045	H	~0.0004	-	✘	-	0.0002	O	~0.0400	-	✘	-	0.0007
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~0.0500	0.0700	✘	0.0600	0.0800																																																																																																									
Si	~0.0000	0.1800	✘	0.1300	0.2300																																																																																																									
Mn	~0.1200	1.0500	✘	1.0000	1.1000																																																																																																									
P	~0.0070	-	✔	-	0.0080																																																																																																									
S	~0.0080	-	✘	-	0.0030																																																																																																									
Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0600																																																																																																									
Al	~0.0000	0.0300	✘	0.0250	0.0350																																																																																																									
B	~0.0001	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0500																																																																																																									
Nb	~0.0000	0.0150	✘	0.0120	0.0180																																																																																																									
Ti	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
V	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Ca	~0.0000	-	✘	0.0010	0.0050																																																																																																									
N	~0.0030	-	✔	-	0.0045																																																																																																									
H	~0.0004	-	✘	-	0.0002																																																																																																									
O	~0.0400	-	✘	-	0.0007																																																																																																									

COMENZAR SIMULACIÓN ▶

Figura 40. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero para vigas de construcción general

Este resumen de datos nos indica el tiempo a emplear en el tratamiento del baño de acero obtenido del convertidor, que debe estar entre 59 minutos y 1 hora y 9 minutos. En la pantalla también se muestra la composición inicial de la colada, los rangos de contenido que deben cumplir cada uno de los elementos presentes en la composición del acero líquido, y con una cruz en rojo se señalan los elementos que no tienen el contenido adecuado y deben ser modificados para obtener el grado de acero deseado, en este caso el C, Si, Mn, Al, Nb y O. Para la colada final del acero líquido se utilizará la máquina de colada de tochos, la temperatura a la cual debe llegar el acero líquido a la máquina de colada debe estar entre 1530 y 1540°C, por debajo de 1530°C comenzaría a solidificar el acero. Como vemos en el resumen inicial del simulador, la composición inicial del acero debe ser ajustada para satisfacer los requerimientos, los elementos que deben ser aumentados de contenido son el carbono, el silicio, el manganeso, el aluminio y el niobio. El hidrógeno y el oxígeno deben ser reducidos. Como vemos este grado de acero tan solo requiere la eliminación de oxígeno disuelto y la adición de ciertas aleaciones para aumentar el contenido de los elementos citados previamente.



Ahora vamos a comenzar con la simulación.

El primer paso es bascular el acero desde el convertidor a la cuchara (figura 25), en el momento de la colada desde el convertidor a la cuchara, realizaremos una adición de aluminio en forma de granallas. Para la reducción del contenido de oxígeno disuelto es necesario incorporar aluminio, y la razón de la elección de granallas en lugar de alambre de aluminio, es debida simplemente a una razón económica, los dos aditivos contienen un 98% de aluminio, en cambio el coste del alambre de aluminio es 700\$ superior, una diferencia muy notable. Primero hay que determinar la cantidad de aluminio a adicionar:

El contenido inicial de oxígeno es de 0,04% (400 ppm), el aluminio necesario para la desoxidación será:

$$\%Al \approx \frac{54}{48} \cdot 0,04 = 0,045\%$$

El aluminio total requerido es la suma del aluminio necesario para la oxidación y el aluminio final de la colada, por tanto:

$$\text{Aluminio total requerido} = 0,045 + 0,03 = 0,075\%$$

Ahora determinamos la masa de adición de aluminio requerida para desoxidar el grado de acero para vigas de construcción general, la tasa de recuperación del aluminio es del 63% en la colada desde el convertidor a la cuchara:

$$m_{Al} = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,075 \cdot 100000}{98\% \cdot 63\%} = 121,47$$

$$\text{kg} \approx 120 \text{ kg}$$

Por tanto la cantidad de aluminio a incorporar en el baño de acero para conseguir una desoxidación óptima será de unos 120 kg, tras la adición durante la colada, se lleva la cuchara a la estación de lavado con argón para favorecer dicha desoxidación.

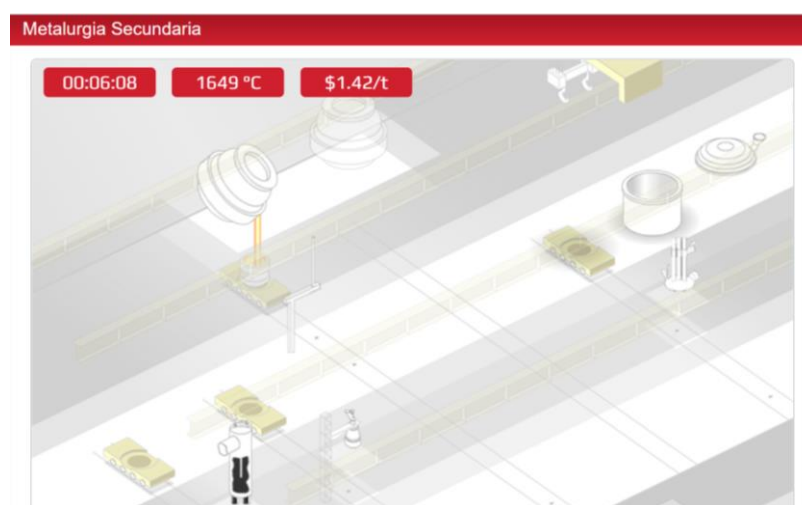


Figura 41. Colada del baño de acero desde el convertidor a la cuchara

A continuación se transportará la cuchara mediante el carro porta-cuchara a la estación de lavado por Argón, la finalidad es la siguiente:

La adición de aluminio al baño de acero provoca una reacción entre el aluminio y el oxígeno disuelto en el acero, el resultado es la formación de partículas de óxido de aluminio (Al_2O_3). Una buena agitación del baño de acero es muy importante para que se produzca una buena mezcla del acero y la adición de aluminio, consiguiendo que más partículas de aluminio reaccionen con el oxígeno disuelto, y por tanto mayor eliminación del oxígeno. Además la agitación también favorece que las partículas formadas de óxido de aluminio lleguen a la escoria donde deben quedar atrapadas, y de esta forma conseguir eliminar el oxígeno inicial presente en el acero. La inyección de flujo de Argón se realizará con un ratio de 0,75 aproximadamente para conseguir una buena agitación, mantendremos la cuchara en la estación de lavado durante 15 minutos reales aproximadamente y detendremos la agitación. La adición de aluminio en el momento de la colada en la cuchara junto con la agitación en la estación de lavado es el sistema más simple y económico para provocar una desoxidación óptima del baño de acero. El siguiente movimiento a realizar, será transportar la cuchara al sistema CAS-OB, a través del puente grúa 1 se eleva la cuchara para cambiarla de carro porta-cuchara como se puede ver en la figura 42.

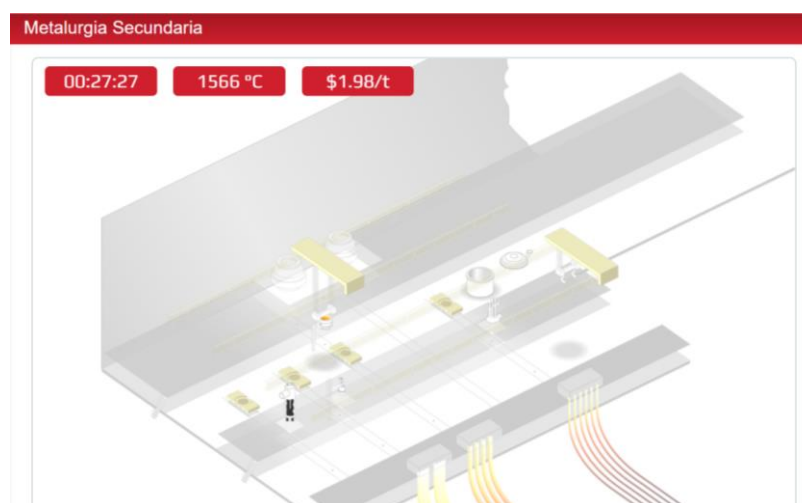


Figura 42. Transporte de la cuchara desde el la estación de lavado por Argón hasta el sistema CAS-OB mediante el puente grúa 1

A continuación el carro porta-cuchara coloca la cuchara debajo del sistema CAS-OB, en el cual se llevará a cabo el afino del acero líquido mediante adiciones de aleantes en atmosfera inerte para modificar la composición del acero. En el sistema CAS-OB realizaremos varias adiciones con la finalidad de ajustar la composición de los elementos que en un principio no tenían la concentración adecuada para el grado de acero requerido. Por cada tonelada de aleantes el baño de acero se enfría 6°C, debido a esto es mejor realizar la adición de aleantes en el sistema CAS-OB, que permite que la velocidad de enfriamiento no sea tan alta debido a que de forma simultánea a la adición de aleantes, se produce un soplado de oxígeno que reacciona exotérmicamente con el aluminio presente en el acero y genera calor. Vamos a determinar de forma teórica y aproximada las adiciones a realizar en el sistema CAS-OB:

- Adición de ferromanganeso de alto carbono para aumentar la concentración de carbono, y de manganeso de 0,12% a 1,4%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (1,4 - 0,12) \cdot 100000}{76,5\% \cdot 95\%} = 1761,26 \text{ kg}$$

La cantidad de carbono incorporado al baño de acero con la adición del ferromanganeso de alto carbono es:



$$\Delta\%C = \frac{\text{aditivo} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} =$$
$$\frac{1761,26 \cdot 6,7\% \cdot 95}{100 \cdot 100000} = 0,1125\% C$$

La cantidad de carbono final será la cantidad inicial más este aumento provocado por la adición de ferromanganeso de alto carbono:

$$[\%C]_f = 0,05 + 0,1125 = 0,1625\% C$$

Este valor es superior al valor final máximo permitido (0,16% C) para este grado de acero por lo que habrá que reducir la cantidad a adicionar de ferromanganeso de alto carbono y adicionar un poco de ferromanganeso de alta pureza para no añadir más carbono del necesario.

La adición de ferromanganeso de alto carbono necesaria para elevar el manganeso y el carbono hasta un contenido adecuado es la siguiente:

$$m = \frac{100 \cdot (1,35 - 0,12) \cdot 100000}{76,5\% \cdot 95\%} = 1692,46 \text{ kg} \approx 1700 \text{ kg}$$

$$\Delta\%C = \frac{1692,46 \cdot 6,7\% \cdot 95}{100 \cdot 100000} = 0,107\% C$$

$$[\%C]_f = 0,107 + 0,05 = 0,157\% C < 0,16\%$$

- Adición de ferromanganeso de alta pureza para aumentar el contenido en manganeso del baño de acero:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (1,4 - 1,35) \cdot 100000}{49\% \cdot 95\%} =$$

$$107,41 \text{ kg} \approx 110 \text{ kg}$$

- Adición de ferro silicio 75 para elevar el contenido en silicio hasta el 0,2%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,2 \cdot 100000}{75\% \cdot 98\%} = 272,1 \text{ kg}$$

$$\approx 270 \text{ kg}$$

- Adición de ferro niobio para aumentar la cantidad de niobio en el acero hasta un 0,042%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,042 \cdot 100000}{63\% \cdot 100\%} = 66,6$$

$$\text{kg} \approx 70 \text{ kg}$$

Finalmente, tras unos 20 minutos en el sistema CAS-OB, la cuchara con el acero líquido ajustado y desoxidado se envía a la máquina de colada para ser solidificado, la cuchara sale del sistema CAS-OB mediante el carro porta-cuchara



y después el puente grúa 2 eleva la cuchara y la lleva hasta la máquina de colada de tochos. Los resultados obtenidos tras esta simulación se muestran en las figuras 43 y 44.



Figura 43. Resumen de resultados para la simulación del grado de acero para vigas de construcción general

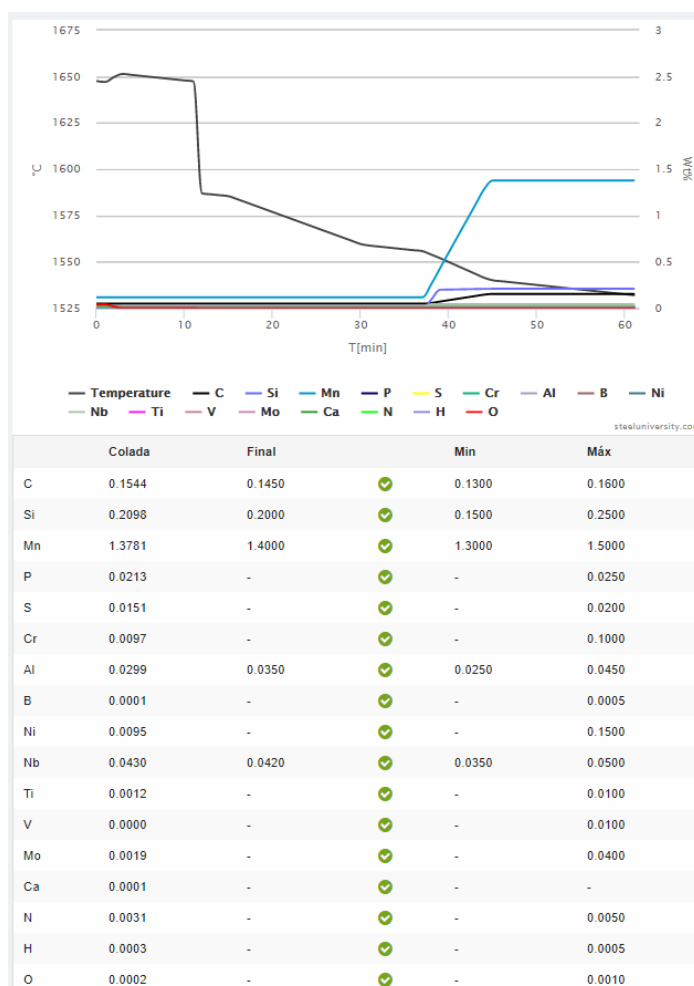


Figura 44. Composición final tras la simulación del acero para vigas de construcción



Como se puede observar la simulación ha sido satisfactoria, el tiempo de tratamiento se ha cumplido, al igual que la temperatura final del acero líquido antes de ser solidificado por la máquina de colada. El nivel de inclusiones final ha sido moderado, que era el objetivo, el coste total es de tan solo 21,35\$ por tonelada de acero, un coste muy reducido, y finalmente la composición del acero final cumple todos los requerimientos a la perfección.

Respecto a los costes existen ciertos costes que no se pueden modificar, es decir, sobre los que no podemos actuar en la simulación, como por ejemplo los costes asociados al desgaste de la lanza de inyección de Argón, al desgaste de electrodos en el horno-cuchara, etc. Los costes sobre los que podemos tener una mayor actuación son los asociados con los aditivos a incorporar en el baño de acero. Para el tratamiento de este grado de acero, los principales costes asociados a los aditivos incorporados al baño de los procesos son los siguientes:

Tabla 11. Tabla de costes asociados a los aditivos para el grado de acero para vigas de construcción general

PROCESO	COSTE
ADICIÓN DE 120 KG DE GRANALLAS DE ALUMINIO	168 \$
ADICIÓN DE 1700 KG DE FERROMANGANESO DE ALTO CARBONO	833 \$
ADICIÓN DE 110 KG DE FERROMANGANESO DE ALTA PUREZA	200 \$
ADICIÓN DE 270 KG DE FERRO SILICIO 75	208 \$
ADICIÓN DE 70 KG DE FERRO NIOBIO	686 \$
COSTE TOTAL = 2095 \$	

En definitiva, el acero obtenido cumple todo los objetivos previos y puede ser usado para la fabricación de vigas para construcción general, su coste por tonelada es difícilmente mejorable, las cantidades a añadir están redondeadas con bastante exactitud para que las adiciones en el simulador sean lo precisas posibles en relación con los valores teóricos calculados. La principal alternativa que tenemos para intentar reducir el coste final, es la elección entre las granallas de aluminio y el alambre de aluminio, este último tiene un coste por tonelada de



2100\$, una diferencia de 700\$ con respecto a las granallas de aluminio, y el contenido en aluminio de ambos componentes es el mismo, de un 98%. Por tanto, podemos concluir que ha sido tomada la mejor opción para reducir el coste final del acero para vigas de construcción, consiguiendo las exigencias demandadas para este grado de acero.

7.6.2 Simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb

La simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb es un poco más compleja, debido principalmente a que este grado de acero requiere de un nivel de carbono considerablemente reducido ($< 0,0035\%$) para conseguir un conformabilidad óptima.

La pantalla previa a la simulación nos ofrece un resumen de datos para este grado de acero que se puede ver en la figura 45.

Grado elegido Acero de ultra-bajo carbono con TiNb Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 250000kg Nivel de inclusión requerido: Muy bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de planchones	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 23 mins \pm 5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1685°C Temperatura final en máquina de colada: 1555-1565°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.0300</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0020 0.0040</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0000</td><td>0.2100</td><td>✘</td><td>0.1500 0.2500</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1000</td><td>0.7500</td><td>✘</td><td>0.6500 0.8500</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0080</td><td>0.0650</td><td>✘</td><td>0.0550 0.0750</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0120</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0500</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>0.0450</td><td>✘</td><td>0.0300 0.0550</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0010 0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0800</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>0.0200</td><td>✘</td><td>0.0100 0.0300</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>0.0300</td><td>✘</td><td>0.0200 0.0350</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>- -</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0100</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>- -</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0040</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0003</td><td>-</td><td>✔</td><td>- 0.0005</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0600</td><td>-</td><td>✘</td><td>- 0.0005</td></tr></tbody></table>		Colada	Final	Min	Máx	C	~0.0300	0.0030	✘	0.0020 0.0040	Si	~0.0000	0.2100	✘	0.1500 0.2500	Mn	~0.1000	0.7500	✘	0.6500 0.8500	P	~0.0080	0.0650	✘	0.0550 0.0750	S	~0.0100	-	✔	- 0.0120	Cr	~0.0100	-	✔	- 0.0500	Al	~0.0000	0.0450	✘	0.0300 0.0550	B	~0.0001	0.0030	✘	0.0010 0.0050	Ni	~0.0100	-	✔	- 0.0800	Nb	~0.0000	0.0200	✘	0.0100 0.0300	Ti	~0.0000	0.0300	✘	0.0200 0.0350	V	~0.0000	-	✔	- -	Mo	~0.0020	-	✔	- 0.0100	Ca	~0.0000	-	✔	- -	N	~0.0020	-	✔	- 0.0040	H	~0.0003	-	✔	- 0.0005	O	~0.0600	-	✘	- 0.0005
	Colada	Final	Min	Máx																																																																																								
C	~0.0300	0.0030	✘	0.0020 0.0040																																																																																								
Si	~0.0000	0.2100	✘	0.1500 0.2500																																																																																								
Mn	~0.1000	0.7500	✘	0.6500 0.8500																																																																																								
P	~0.0080	0.0650	✘	0.0550 0.0750																																																																																								
S	~0.0100	-	✔	- 0.0120																																																																																								
Cr	~0.0100	-	✔	- 0.0500																																																																																								
Al	~0.0000	0.0450	✘	0.0300 0.0550																																																																																								
B	~0.0001	0.0030	✘	0.0010 0.0050																																																																																								
Ni	~0.0100	-	✔	- 0.0800																																																																																								
Nb	~0.0000	0.0200	✘	0.0100 0.0300																																																																																								
Ti	~0.0000	0.0300	✘	0.0200 0.0350																																																																																								
V	~0.0000	-	✔	- -																																																																																								
Mo	~0.0020	-	✔	- 0.0100																																																																																								
Ca	~0.0000	-	✔	- -																																																																																								
N	~0.0020	-	✔	- 0.0040																																																																																								
H	~0.0003	-	✔	- 0.0005																																																																																								
O	~0.0600	-	✘	- 0.0005																																																																																								

Figura 45. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero de ultra bajo carbono con TiNb

En este caso, el tiempo mínimo de tratamiento en los procesos de metalurgia secundaria tiene que ser de 1 hora y 18 minutos, y el tiempo máximo de 1 hora



y 28 minutos. Para el acero de ultra bajo carbono con TiNB los elementos que deben ser ajustados son el C, Si, Mn, P, Al, B, Nb, Ti, y O. La máquina de colada a emplear será la máquina de colada de planchones, la temperatura a la que debe llegar el acero debe estar entre 1555 y 1565°C.

Elementos como el silicio, el manganeso, el fosforo, el aluminio, el boro, el niobio y el titanio deben aumentar su contenido en el acero final exigido. En cambio el contenido en carbono y oxígeno en el acero listo para solidificar debe verse reducido en comparación con sus niveles iniciales como se puede observar en el resumen de datos previo a la simulación.

Una vez analizados estos datos podemos comenzar con la simulación.

El primer paso es bascular el acero desde el convertidor a la cuchara. A continuación llevaremos la cuchara mediante el puente grúa 1 al desgasificador por recirculación (RH) con la finalidad de reducir el contenido inicial en carbono del baño de acero. En el desgasificador por recirculación, el acero es desgasificado por fracciones, el sistema RH se basa en una cámara de vacío o reactor RH que se conecta a la cuchara de forma hermética por la parte superior de la cuchara. El reactor RH cuenta con dos snorkels o tubos que conectan la cuchara con el reactor o cámara de vacío, los dos tubos se introducen en el baño de acero, cuando se genera el vacío el acero líquido asciende por un de los tubos debido a la acción de un flujo de Argón, y el acero se desgasifica. Por el segundo snorkel, el acero ya desgasificado desciende de nuevo a la cuchara por acción de la gravedad, generándose así un flujo continuo de acero entre la cuchara y el desgasificador RH. Vamos a determinar el tiempo aproximado para que la descarburación sea óptima, suponemos un contenido de carbono en equilibrio de 0,025%:

$$t = -\frac{1}{k_c} \cdot \ln \left[\frac{[\%C]_f - [\%C]_{eq}}{[\%C]_i - [\%C]_{eq}} \right] = -\frac{1}{0,164} \cdot \ln \left[\frac{0,003 - 0,0025}{0,03 - 0,0025} \right] = 24,43 \text{ min}$$

El acero se desgasificará durante aproximadamente 25 minutos en tiempo real, tiempo suficiente para provocar una buena descarburación, y después se enviará



la cuchara al horno de arco eléctrico. El puente grúa 1 eleva la cuchara y la lleva hasta el carro porta-cuchara correspondiente para colocar la cuchara en la posición correcta para ser sometida a la acción del horno cuchara.

En el horno cuchara se produce un recalentamiento inducido por unos electrodos que crean un arco eléctrico que produce el calentamiento del baño de acero. La cuchara se coloca en el interior del horno de arco que cuenta con tuberías para inyectar el gas inerte y provocar la agitación en la zona inferior, conexión con la tolva de adiciones y una tapa o bóveda para cerrarse de forma hermética y por la que pasan tres electrodos.

Durante el proceso en el horno cuchara se van a realizar las adiciones al baño de acero con la finalidad de ajustar su composición en base a los requerimientos del grado final de acero necesario para este caso. En este grado de acero, el mejor momento para realizar las adiciones es en el horno cuchara, la explicación es sencilla. El volumen de adiciones a realizar en este grado de acero es bastante grande, debido a esto el enfriamiento provocado en el baño será mayor, como se mencionó previamente en el apartado 7.4, por cada tonelada de aleantes incorporada al baño, se induce un enfriamiento de 6°C. Realizando las adiciones en el horno cuchara, el enfriamiento del baño de acero se verá contrarrestado parcialmente por el calentamiento inducido por el arco eléctrico, valorado en 1,5°C por minuto, y de esta forma la velocidad de enfriamiento será más reducida realizando la adición de aleantes en el horno cuchara.

- Adición de ferromanganeso de bajo carbono para aumentar la concentración de manganeso de 0,1% a 0,75%, y también en menor medida el contenido de carbono.

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,75 - 0,1) \cdot 250000}{81,5\% \cdot 95\%} = 2098,80 \text{ kg}$$

La cantidad de carbono incorporado con la adición del ferromanganeso de bajo carbono es:



$$\Delta\%C = \frac{\text{aditivo} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} =$$
$$\frac{2098,80 \cdot 0,85\% \cdot 95}{100 \cdot 250000} = 6,8 \times 10^{-3}\% \text{ C}$$

La cantidad de carbono tras esta adición será, la cantidad inicial de carbono previa a la adición, en este caso es de 0,003% C ya que ya se ha realizado la descarburación en el desgasificador por recirculación, más este aumento provocado por la adición de ferromanganeso de bajo carbono:

$$[\%C]_f = 0,003 + 6,8 \times 10^{-3} = 0,009\% \text{ C}$$

Este valor supera del contenido final máximo permitido (0,004% C) para este grado de acero, por lo que es imprescindible reducir la cantidad a adicionar de ferromanganeso de bajo carbono y adicionar en su lugar ferromanganeso de alta pureza para no añadir más carbono del necesario.

Adición de ferromanganeso de bajo carbono para elevar el manganeso hasta un 0,25%, para no producir un incremento desmedido del carbono:

$$m = \frac{100 \cdot (0,25 - 0,1) \cdot 250000}{81,5\% \cdot 95\%} = 484,34 \text{ kg} \approx 490 \text{ kg}$$

$$\Delta\%C = \frac{484,34 \cdot 0,85\% \cdot 95}{100 \cdot 250000} = 1,56 \times 10^{-3}\% \text{ C}$$

$$[\%C]_f = 0,003 + 1,56 \times 10^{-3} \approx 0,004\% \text{ C}$$

- Adición de ferromanganeso de alta pureza para aumentar el contenido en manganeso del baño de acero:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,75 - 0,25) \cdot 250000}{49\% \cdot 95\%} =$$
$$2685,28 \text{ kg} \approx 2690 \text{ kg}$$

- Adición de ferro silicio 75, de alta pureza, para no incrementar el contenido de carbono y elevar el contenido en silicio hasta el 0,21%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,21 \cdot 250000}{75\% \cdot 98\%} = 714,28$$
$$\text{kg} \approx 710 \text{ kg}$$

- Adición de granallas de aluminio para incrementar la cantidad de aluminio en el baño de acero y provocar la desoxidación



El contenido inicial de oxígeno es de 0,06% (600 ppm), el aluminio necesario para la desoxidación será:

$$\%Al \approx \frac{54}{48} \cdot 0,06 = 0,0675\%$$

El aluminio total requerido es la suma del aluminio necesario para la oxidación y el aluminio final de la colada, por tanto:

$$\text{Aluminio total requerido} = 0,0675 + 0,045 = 0,1125\%$$

Ahora determinamos la masa de adición de aluminio requerida para desoxidar el grado de acero de ultra bajo carbono con TiNb:

$$m_{Al} = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,1125 \cdot 250000}{98\% \cdot 90\%} = 318,88 \text{ kg} \approx 320 \text{ kg}$$

Por tanto la cantidad de aluminio a incorporar en el baño de acero para conseguir una desoxidación óptima será de unos 320 kg.

- Adición de ferro boro para elevar el contenido de boro en el acero desde un 0,0001% hasta un 0,003%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,003 - 0,0001) \cdot 250000}{20\% \cdot 100\%} = 36,25 \text{ kg} \approx 40 \text{ kg}$$

- Adición de ferro niobio para aumentar la cantidad de niobio en el acero hasta un 0,02%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,02 \cdot 250000}{63\% \cdot 100\%} = 79,36 \text{ kg} \approx 80 \text{ kg}$$

- Adición de ferro fósforo para incrementar el contenido de fósforo en el acero de un 0,008% hasta un 0,065%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,065 - 0,008) \cdot 250000}{26\% \cdot 98\%} = 559,26 \text{ kg} \approx 560 \text{ kg}$$

- Adición de titanio para aumentar la cantidad de titanio en el acero hasta un 0,03%:



$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,03 \cdot 250000}{99\% \cdot 90\%} = 84,17$$

kg \approx 80 kg

El tiempo de tratamiento del acero en el horno cuchara será de unos 45 minutos reales para conseguir una buena mezcla y homogeneización de las adiciones.

Finalmente se envía la cuchara a la máquina de colada, la cuchara se mueve mediante el carro porta-cuchara y después el puente grúa 2 iza la cuchara y la lleva hasta la máquina de colada de planchones donde se solidificará el acero líquido obtenido. Los resultados obtenidos en esta simulación se pueden ver en las figuras 46 y 47.

Nivel de usuario		Objetivo	
Estudiante universitario			
Grado de acero			
Acero de ultra-bajo carbono con TiNb			
Registro de eventos			
Tiempo	01H:21M	✓	01H:23M +/-5M
Temperatura	1557°C	✓	1555-1565°C
Inclusiones	Muy bajo	✓	Muy bajo
Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✓	Máquina de colada de planchones
Costo Total	33.26/t		

Figura 46. Resumen de datos tras la simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb

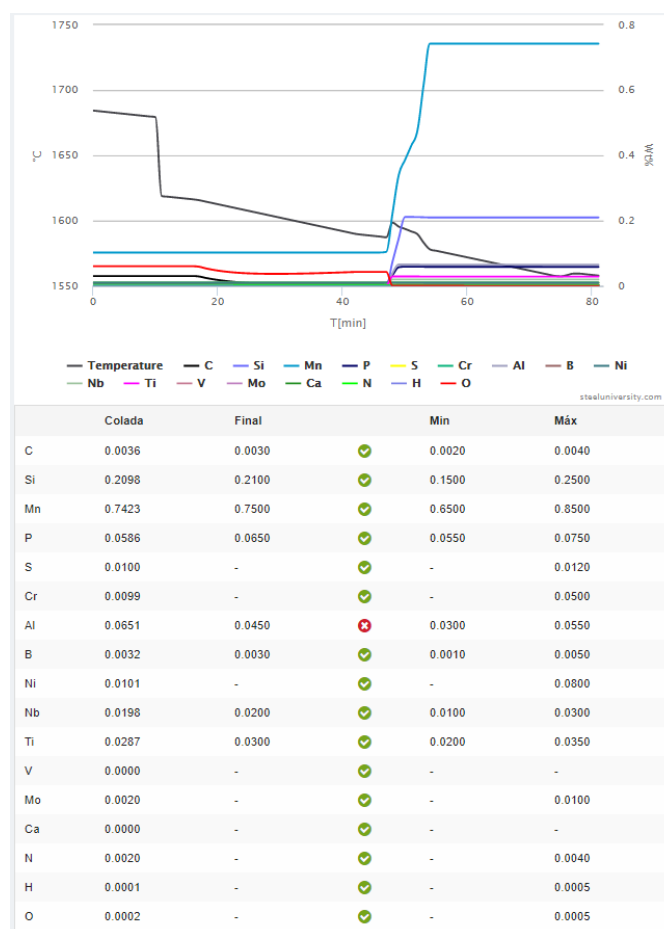


Figura 47. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb

Como se puede observar, el tiempo de tratamiento, así como la temperatura final del acero líquido y el nivel de inclusiones obtenido has sido correctos, pero la composición final no es la adecuada. El contenido de aluminio (0,0651%) es superior al máximo exigido (0,055%), por lo tanto, es necesario reducir la adición de aluminio para evitar un incremento excesivo en la composición final del acero.

A continuación realizaremos la segunda simulación, pero en este caso modificaremos la adición de aluminio, ya que parece que el valor teórico calculado no es el adecuado. Si con la adición de 320 kg de aluminio se consigue un incremento del 0,0651% en el contenido del aluminio en el baño de acero, para incrementar el aluminio hasta un 0,045% vamos a reducir la adición un 25% aproximadamente, es decir, la adición total de granallas de aluminio será de:

$$320 \text{ kg} - \left(320 \cdot \frac{25}{100}\right) = 320 - 80 \approx 240 \text{ kg}$$



Para esta nueva simulación seguimos exactamente los mismos pasos seguidos en la anterior, simplemente añadimos 240 kg de granallas de aluminio, en lugar de 320 kg, en el horno cuchara. Los resultados para esta nueva simulación se muestran en las figuras 49 y 50. Al igual que en el caso anterior los objetivos son exactamente iguales y la composición inicial también, pero el tiempo de simulación cambia, y debe estar entre 1 hora y 24 minutos y 1 hora y 34 minutos, como se puede ver en la figura 48.

Grado elegido Acero de ultra-bajo carbono con TiNb Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 250000kg Nivel de inclusión requerido: Muy bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de planchones	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 29 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1685°C Temperatura final en máquina de colada: 1555-1565°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th></th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.0300</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0020</td><td>0.0040</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0000</td><td>0.2100</td><td>✘</td><td>0.1500</td><td>0.2500</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1000</td><td>0.7500</td><td>✘</td><td>0.6500</td><td>0.8500</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0080</td><td>0.0650</td><td>✘</td><td>0.0550</td><td>0.0750</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0120</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0500</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>0.0450</td><td>✘</td><td>0.0300</td><td>0.0550</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0010</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0800</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>0.0200</td><td>✘</td><td>0.0100</td><td>0.0300</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>0.0300</td><td>✘</td><td>0.0200</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0040</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0003</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0600</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr></tbody></table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~0.0300	0.0030	✘	0.0020	0.0040	Si	~0.0000	0.2100	✘	0.1500	0.2500	Mn	~0.1000	0.7500	✘	0.6500	0.8500	P	~0.0080	0.0650	✘	0.0550	0.0750	S	~0.0100	-	✔	-	0.0120	Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0500	Al	~0.0000	0.0450	✘	0.0300	0.0550	B	~0.0001	0.0030	✘	0.0010	0.0050	Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0800	Nb	~0.0000	0.0200	✘	0.0100	0.0300	Ti	~0.0000	0.0300	✘	0.0200	0.0350	V	~0.0000	-	✔	-	-	Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100	Ca	~0.0000	-	✔	-	-	N	~0.0020	-	✔	-	0.0040	H	~0.0003	-	✔	-	0.0005	O	~0.0600	-	✘	-	0.0005
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~0.0300	0.0030	✘	0.0020	0.0040																																																																																																									
Si	~0.0000	0.2100	✘	0.1500	0.2500																																																																																																									
Mn	~0.1000	0.7500	✘	0.6500	0.8500																																																																																																									
P	~0.0080	0.0650	✘	0.0550	0.0750																																																																																																									
S	~0.0100	-	✔	-	0.0120																																																																																																									
Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0500																																																																																																									
Al	~0.0000	0.0450	✘	0.0300	0.0550																																																																																																									
B	~0.0001	0.0030	✘	0.0010	0.0050																																																																																																									
Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0800																																																																																																									
Nb	~0.0000	0.0200	✘	0.0100	0.0300																																																																																																									
Ti	~0.0000	0.0300	✘	0.0200	0.0350																																																																																																									
V	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Ca	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
N	~0.0020	-	✔	-	0.0040																																																																																																									
H	~0.0003	-	✔	-	0.0005																																																																																																									
O	~0.0600	-	✘	-	0.0005																																																																																																									

Figura 48. Resumen previo a la segunda simulación para el acero de ultra bajo carbono con TiNb

Los resultados obtenidos tras esta segunda simulación son satisfactorios, y se pueden observar en las figuras 47 y 48.

Nivel de usuario Estudiante universitario Grado de acero Acero de ultra-bajo carbono con TiNb Registro de eventos	<table border="1"><thead><tr><th></th><th></th><th>Objetivo</th></tr></thead><tbody><tr><td>Tiempo</td><td>01H:30M</td><td>✔ 01H:29M +/-5M</td></tr><tr><td>Temperatura</td><td>1558°C</td><td>✔ 1555-1565°C</td></tr><tr><td>Inclusiones</td><td>Muy bajo</td><td>✔ Muy bajo</td></tr><tr><td>Máquina de colada</td><td>Máquina de colada de planchones</td><td>✔ Máquina de colada de planchones</td></tr><tr><td>Costo Total</td><td>34.43/t</td><td></td></tr></tbody></table>			Objetivo	Tiempo	01H:30M	✔ 01H:29M +/-5M	Temperatura	1558°C	✔ 1555-1565°C	Inclusiones	Muy bajo	✔ Muy bajo	Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✔ Máquina de colada de planchones	Costo Total	34.43/t	
		Objetivo																	
Tiempo	01H:30M	✔ 01H:29M +/-5M																	
Temperatura	1558°C	✔ 1555-1565°C																	
Inclusiones	Muy bajo	✔ Muy bajo																	
Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✔ Máquina de colada de planchones																	
Costo Total	34.43/t																		

Figura 49. Resumen de datos tras la segunda simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb

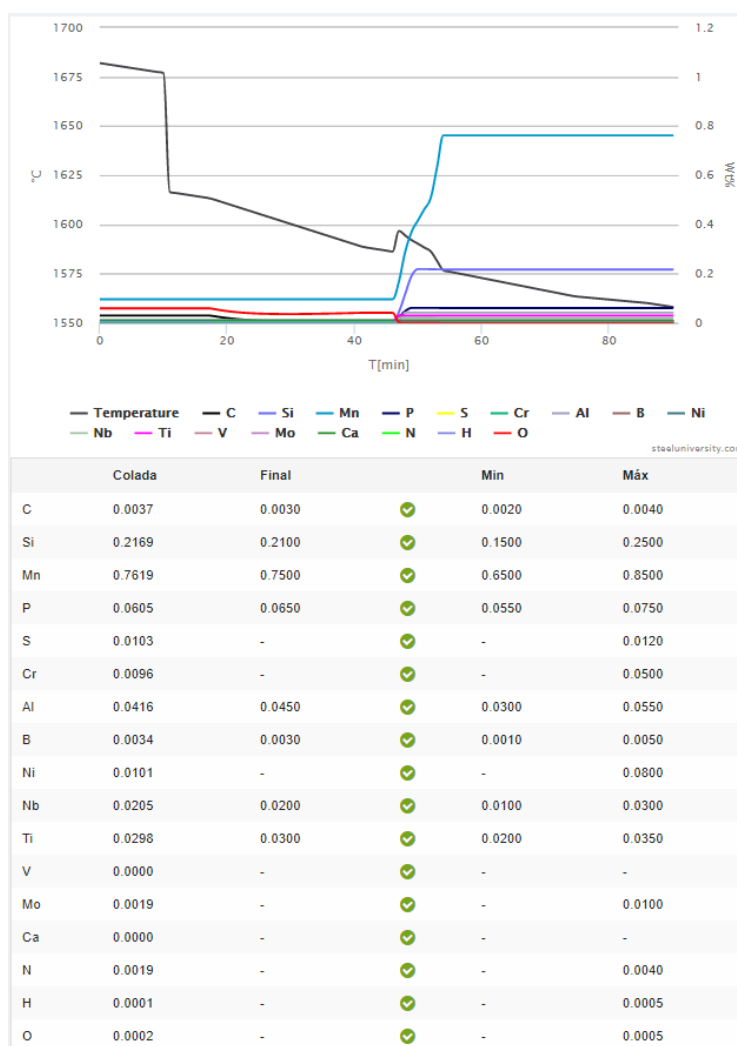


Figura 50. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb tras la segunda simulación

Después de la segunda simulación los resultados obtenidos ya son los exigidos, el tiempo de tratamiento y temperatura final requerida son correctos. El nivel de inclusiones final ha sido muy bajo, tal y como se exigía, el coste total es de 34,43\$ por tonelada de acero, y la composición del acero final cumple con todos los requerimientos.

Para el grado de acero de ultra bajo carbono, los costes asociados a las adiciones realizadas, son los siguientes:

Tabla 12. Tabla de costes asociados a los aditivos para el grado de acero de ultra bajo carbono con TiNb

PROCESO	COSTE
ADICIÓN DE 490 KG DE FERROMANGANESO DE BAJO CARBONO	412 \$



ADICIÓN DE 2690 KG DE FERROMANGANESO DE ALTA PUREZA	4896 \$
ADICIÓN DE 710 KG DE FERRO SILICIO 75 DE ALTA PUREZA	596 \$
ADICIÓN DE 240 KG DE GRANALLAS DE ALUMINIO	336 \$
ADICIÓN DE 40 KG DE FERRO BORO	151 \$
ADICIÓN DE 80 KG DE FERRO NIOBIO	784 \$
ADICIÓN DE 560 KG DE FERRO FÓSFORO	315 \$
ADICIÓN DE 80 KG DE TITANIO	224 \$
COSTE TOTAL = 7714 \$	

El acero obtenido tras la segunda simulación es un acero de ultra bajo carbono con TiNb que puede ser usado como tal, generalmente empleado para fabricar piezas para la carrocería de automóviles. La elección de granallas de aluminio en lugar de alambre de aluminio para añadir aluminio al baño de acero es la opción más significativa que tenemos para reducir el coste del acero final. Analizando los resultados obtenidos, podemos ver que los contenidos de manganeso y silicio son más altos de los requeridos, por lo que se puede intentar reducir el coste por tonelada del acero final reduciendo las cantidades adicionadas de ferro silicio 75 de alta pureza y ferromanganeso de alta pureza. Vamos a realizar una nueva simulación para intentar reducir aún más el coste final.

En esta nueva simulación vamos a realizar las mismas adiciones que en la segunda simulación, salvo para las adiciones de ferro silicio 75 de alta pureza y ferromanganeso de alta pureza, las modificaciones con respecto a la segunda simulación son las siguientes:

- Adición de 550 kg de ferro silicio 75 de alta pureza
- Adición de 2580 kg de ferro manganeso de alta pureza

Para esta tercera simulación, los datos iniciales son exactamente los mismos, únicamente varía el período de tiempo a tratar el acero líquido, como se puede observar en la figura 49, ahora el rango de tiempo en el que se debe realizar el tratamiento está entre 1 hora y 15 minutos, y 1 hora y 25 minutos.



Grado elegido Acero de ultra-bajo carbono con TiNb Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 250000kg Nivel de inclusión requerido: Muy bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de planchones	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 20 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1685°C Temperatura final en máquina de colada: 1555-1565°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th></th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~-0.0300</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0020</td><td>0.0040</td></tr><tr><td>Si</td><td>~-0.0000</td><td>0.2100</td><td>✘</td><td>0.1500</td><td>0.2500</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~-0.1000</td><td>0.7500</td><td>✘</td><td>0.6500</td><td>0.8500</td></tr><tr><td>P</td><td>~-0.0080</td><td>0.0650</td><td>✘</td><td>0.0550</td><td>0.0750</td></tr><tr><td>S</td><td>~-0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0120</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~-0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0500</td></tr><tr><td>Al</td><td>~-0.0000</td><td>0.0450</td><td>✘</td><td>0.0300</td><td>0.0550</td></tr><tr><td>B</td><td>~-0.0001</td><td>0.0030</td><td>✘</td><td>0.0010</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~-0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0800</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~-0.0000</td><td>0.0200</td><td>✘</td><td>0.0100</td><td>0.0300</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~-0.0000</td><td>0.0300</td><td>✘</td><td>0.0200</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>V</td><td>~-0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~-0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~-0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>N</td><td>~-0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0040</td></tr><tr><td>H</td><td>~-0.0003</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr><tr><td>O</td><td>~-0.0600</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr></tbody></table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~-0.0300	0.0030	✘	0.0020	0.0040	Si	~-0.0000	0.2100	✘	0.1500	0.2500	Mn	~-0.1000	0.7500	✘	0.6500	0.8500	P	~-0.0080	0.0650	✘	0.0550	0.0750	S	~-0.0100	-	✔	-	0.0120	Cr	~-0.0100	-	✔	-	0.0500	Al	~-0.0000	0.0450	✘	0.0300	0.0550	B	~-0.0001	0.0030	✘	0.0010	0.0050	Ni	~-0.0100	-	✔	-	0.0800	Nb	~-0.0000	0.0200	✘	0.0100	0.0300	Ti	~-0.0000	0.0300	✘	0.0200	0.0350	V	~-0.0000	-	✔	-	-	Mo	~-0.0020	-	✔	-	0.0100	Ca	~-0.0000	-	✔	-	-	N	~-0.0020	-	✔	-	0.0040	H	~-0.0003	-	✔	-	0.0005	O	~-0.0600	-	✘	-	0.0005
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~-0.0300	0.0030	✘	0.0020	0.0040																																																																																																									
Si	~-0.0000	0.2100	✘	0.1500	0.2500																																																																																																									
Mn	~-0.1000	0.7500	✘	0.6500	0.8500																																																																																																									
P	~-0.0080	0.0650	✘	0.0550	0.0750																																																																																																									
S	~-0.0100	-	✔	-	0.0120																																																																																																									
Cr	~-0.0100	-	✔	-	0.0500																																																																																																									
Al	~-0.0000	0.0450	✘	0.0300	0.0550																																																																																																									
B	~-0.0001	0.0030	✘	0.0010	0.0050																																																																																																									
Ni	~-0.0100	-	✔	-	0.0800																																																																																																									
Nb	~-0.0000	0.0200	✘	0.0100	0.0300																																																																																																									
Ti	~-0.0000	0.0300	✘	0.0200	0.0350																																																																																																									
V	~-0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
Mo	~-0.0020	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Ca	~-0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
N	~-0.0020	-	✔	-	0.0040																																																																																																									
H	~-0.0003	-	✔	-	0.0005																																																																																																									
O	~-0.0600	-	✘	-	0.0005																																																																																																									

COMENZAR SIMULACIÓN ▶

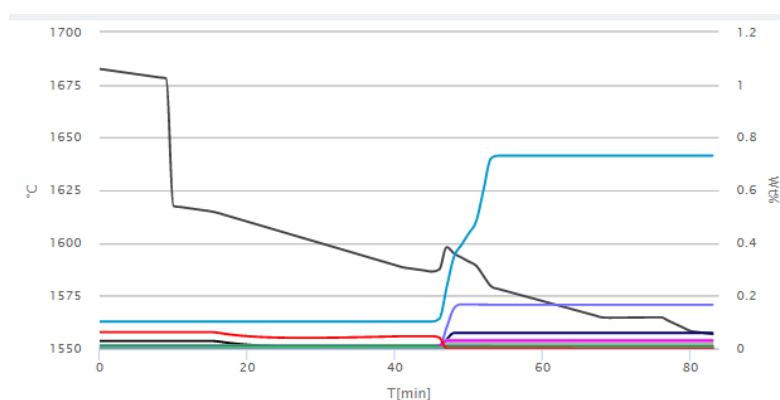
Figure 51. Resumen de datos previo a la tercera simulación para el acero de ultra bajo carbono con TiNb

Los resultados obtenidos tras esta tercera simulación son excelentes, se vuelven a cumplir todos los objetivos marcados (figura 52), la composición final del acero es óptima (figura 53), y el coste se ha reducido considerablemente. El coste de cada tonelada de acero en la segunda simulación era de 34,43\$, en esta última simulación el coste final de acero es de 31,64\$ por tonelada, una diferencia de casi 3\$ por tonelada de acero fabricado. Esta diferencia de 3\$ puede parecer insignificante, pero teniendo en cuenta que en las grandes siderurgias fabrican millones de toneladas es muy significativa. Por ejemplo, ArcelorMittal produjo en España, durante 2015, un total de 7,2 millones de toneladas de acero líquido (dato verídico de la página de ArcelorMittal España), para este caso particular la diferencia de 3\$ por tonelada se convertiría en una diferencia de 21,6 millones de dólares en el año 2015, por lo que el ahorro que se puede conseguir es enorme.



Nivel de usuario Estudiante universitario Grado de acero Acero de ultra-bajo carbono con TiNb Registro de eventos		Objetivo	
Tiempo	01H:23M	✓	01H:20M +/-5M
Temperatura	1556°C	✓	1555-1565°C
Inclusiones	Muy bajo	✓	Muy bajo
Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✓	Máquina de colada de planchones
Costo Total	31.64/t		

Figura 52. Resumen de datos tras la última simulación del acero de ultra bajo carbono con TiNb



	Colada	Final	Min	Máx
C	0.0035	0.0030	0.0020	0.0040
Si	0.1661	0.2100	0.1500	0.2500
Mn	0.7313	0.7500	0.6500	0.8500
P	0.0589	0.0650	0.0550	0.0750
S	0.0101	-	-	0.0120
Cr	0.0101	-	-	0.0500
Al	0.0328	0.0450	0.0300	0.0550
B	0.0033	0.0030	0.0010	0.0050
Ni	0.0098	-	-	0.0800
Nb	0.0201	0.0200	0.0100	0.0300
Ti	0.0292	0.0300	0.0200	0.0350
V	0.0000	-	-	-
Mo	0.0020	-	-	0.0100
Ca	0.0000	-	-	-
N	0.0020	-	-	0.0040
H	0.0001	-	-	0.0005
O	0.0002	-	-	0.0005

Figure 53. Composición final del acero de ultra bajo carbono con TiNb en la tercera simulación



7.6.3 Simulación del acero para tuberías de distribución de gas

El grado de acero para fabricación de tuberías de distribución de gas exige unos niveles muy bajos de azufre e hidrogeno, a fin de tener una resistencia y tenacidad adecuadas para evitar posibles fisuras o roturas.

El resumen de datos para este grado de acero es el siguiente:

Grado elegido Acero para tuberías de distribución de gas Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 250000kg Nivel de inclusión requerido: Muy bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de planchones	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 36 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1675°C Temperatura final en máquina de colada: 1527-1552°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th></th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.0500</td><td>0.0700</td><td>✘</td><td>0.0600</td><td>0.0800</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0000</td><td>0.1800</td><td>✘</td><td>0.1300</td><td>0.2300</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1200</td><td>1.0500</td><td>✘</td><td>1.0000</td><td>1.1000</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0070</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0080</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0080</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0030</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0600</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>0.0300</td><td>✘</td><td>0.0250</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0500</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>0.0150</td><td>✘</td><td>0.0120</td><td>0.0180</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.0010</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0030</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0045</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0004</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0002</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0400</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0007</td></tr></tbody></table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~0.0500	0.0700	✘	0.0600	0.0800	Si	~0.0000	0.1800	✘	0.1300	0.2300	Mn	~0.1200	1.0500	✘	1.0000	1.1000	P	~0.0070	-	✔	-	0.0080	S	~0.0080	-	✘	-	0.0030	Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0600	Al	~0.0000	0.0300	✘	0.0250	0.0350	B	~0.0001	-	✔	-	0.0050	Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0500	Nb	~0.0000	0.0150	✘	0.0120	0.0180	Ti	~0.0000	-	✔	-	0.0100	V	~0.0000	-	✔	-	0.0100	Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100	Ca	~0.0000	-	✘	0.0010	0.0050	N	~0.0030	-	✔	-	0.0045	H	~0.0004	-	✘	-	0.0002	O	~0.0400	-	✘	-	0.0007
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~0.0500	0.0700	✘	0.0600	0.0800																																																																																																									
Si	~0.0000	0.1800	✘	0.1300	0.2300																																																																																																									
Mn	~0.1200	1.0500	✘	1.0000	1.1000																																																																																																									
P	~0.0070	-	✔	-	0.0080																																																																																																									
S	~0.0080	-	✘	-	0.0030																																																																																																									
Cr	~0.0100	-	✔	-	0.0600																																																																																																									
Al	~0.0000	0.0300	✘	0.0250	0.0350																																																																																																									
B	~0.0001	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
Ni	~0.0100	-	✔	-	0.0500																																																																																																									
Nb	~0.0000	0.0150	✘	0.0120	0.0180																																																																																																									
Ti	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
V	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Ca	~0.0000	-	✘	0.0010	0.0050																																																																																																									
N	~0.0030	-	✔	-	0.0045																																																																																																									
H	~0.0004	-	✘	-	0.0002																																																																																																									
O	~0.0400	-	✘	-	0.0007																																																																																																									

COMENZAR SIMULACIÓN ▶

Figura 54. Resumen de datos previo a la primera simulación del acero para tuberías de distribución de gas

El tiempo que debe transcurrir desde que el acero es colado en la cuchara hasta que es colado en la máquina de colada no debe ser inferior a 1 hora y 31 minutos, y tampoco debe ser superior a una hora y 41 minutos. El resumen de datos nos indica que los elementos que no presentan una concentración adecuada para la composición requerida en este caso son el C, Si, Mn, S, Al, Nb, Ca, H y O, por lo que deben ser modificados mediante los diferentes sistemas de tratamiento disponibles en el simulador. La máquina de colada a utilizar para este grado de



acero será nuevamente la máquina de planchones, con el acero líquido a una temperatura de entre 1527 y 1552°C.

Los elementos que deben aumentar su contenido en este grado de acero son el carbono, el silicio, el manganeso, el aluminio, el niobio y el calcio deben aumentar su contenido en el acero final exigido. En cambio el contenido en azufre, hidrogeno y oxígeno debe ser reducido como podemos ver en el resumen de datos previo a la simulación.

Ahora vamos a iniciar la simulación.

Para este grado de acero realizaremos algunas adiciones en el instante de la colada desde el convertidor a la cuchara.

- Adición de escoria sintética desulfurante a base de óxido de calcio. Vamos a determinar la cantidad mínima aproximada de escoria sintética a incorporar en el acero líquido para conseguir la desulfuración deseada y conseguir un contenido final de azufre del 0,002% aproximadamente:

$$W_s = \left(\frac{Wm}{Ls} \right) \cdot \left(\frac{[\%S]i - [\%S]f}{[\%S]f} \right) = \left(\frac{250000}{500} \right) \cdot \left(\frac{0,008 - 0,002}{0,002} \right) \approx 1500 \text{ kg}$$

Por tanto realizaremos una adición de 1500 kg de escoria sintética desulfurante con una relación entre CaO y Al₂O₃ de 45:37, con una mayor contenido de óxido de calcio conseguimos que el poder desulfurante de la escoria sea mayor pero también requiere que la temperatura sea más alta para evitar la solidificación de la escoria.

- Adición de granallas de aluminio para añadir aluminio al baño de acero e inducir la desoxidación mediante la reacción del aluminio con el oxígeno disuelto en el acero.

El contenido inicial de oxígeno es de 0,04% (400 ppm), el aluminio necesario para la desoxidación será:

$$\%Al \approx \frac{54}{48} \cdot 0,04 = 0,045\%$$

El aluminio total requerido es la suma del aluminio necesario para la oxidación y el aluminio final de la colada, por tanto:



Aluminio total requerido = 0,045 + 0,03 = 0,075%

Ahora determinamos la masa de adición de aluminio requerida para desoxidar el acero para tuberías de distribución de gas:

$$m_{Al} = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,075 \cdot 250000}{98\% \cdot 63\%} =$$

$$303,69 \text{ kg} \approx 300 \text{ kg}$$

Por tanto la cantidad de aluminio a incorporar en el baño de acero para conseguir una desoxidación óptima será de unos 300 kg.

A continuación, el siguiente tratamiento a realizar será el afino mediante el proceso CAS-OB, la cuchara es movilizada por el carro porta-cuchara y después el puente grúa 1 la eleva y la lleva hasta el carro porta cuchara que la colocará en la posición adecuada para que comience la operación en el sistema CAS-OB.

El sistema CAS-OB permite realizar una adición de aleantes de forma conjunta con un soplado de oxígeno y de Argón, este último moviliza la escoria dejando una zona en la superficie del baño de acero libre de escoria donde se adicionan los aleante y permite una mejor adición de estos elementos al acero. Como ya sabemos la adición de aleantes provoca un enfriamiento en el acero líquido, ese enfriamiento se contrarresta en parte mediante la inyección de oxígeno que, al entrar en contacto con el aluminio presente en el baño de acero, reacciona exotérmicamente produciendo calor y reduciendo la velocidad de enfriamiento del acero líquido provocada por los aleantes incorporados. Esto permite que el baño de acero no reduzca su temperatura demasiado y así evitamos que la escoria sintética añadida solidifique.

Las adiciones a realizar, para ajustar la composición del baño de acero, durante el proceso CAS-OB son las siguientes:

- Adición de ferromanganeso de bajo carbono para aumentar los niveles de manganeso de 0,12% a 1,05% y también de carbono

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (1,05 - 0,12) \cdot 250000}{81,5\% \cdot 95\%} =$$

$$3002,9 \text{ kg} \approx 3000 \text{ kg}$$



La cantidad de carbono incorporado con la adición del ferromanganeso de bajo carbono es:

$$\Delta\%C = \frac{\text{madio} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} = \frac{3002,9 \cdot 0,85\% \cdot 95}{100 \cdot 250000} = 9,7 \times 10^{-3}\% \text{ C}$$

La cantidad de carbono tras esta adición será, la cantidad inicial de carbono previa a la adición, en este caso es de 0,05% C ya que ya se ha realizado la descarburación en el desgasificador por recirculación, más este aumento provocado por la adición de ferromanganeso de bajo carbono:

$$[\%C]_f = 0,05 + 9,7 \times 10^{-3} = 0,059\% \text{ C}$$

Este valor no llega al contenido mínimo de carbono requerido (0,06% C) para este grado de acero, por lo que es necesario incrementar la cantidad de carbono en el acero líquido

- Adición de recarburante para añadir carbono al acero e incrementar su contenido desde un 0,059% a un 0,075%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,075 - 0,059) \cdot 250000}{98\% \cdot 95\%} = 42,9 \text{ kg} \approx 40 \text{ kg}$$

- Adición de ferro silicio 75 para elevar el contenido de silicio hasta un 0,18%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,18 \cdot 250000}{75\% \cdot 98\%} = 612,24 \text{ kg} \approx 610 \text{ kg}$$

- Adición de ferro niobio para aumentar el niobio inicial hasta un 0,015%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,015 \cdot 250000}{63\% \cdot 100\%} = 59,52 \text{ kg} \approx 60 \text{ kg}$$

- Adición de calcio mediante inyección de gotas de calcio para elevar el contenido de calcio en el acero hasta un rango entre un 0,001% y 0,005%:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,002 \cdot 250000}{50\% \cdot 15\%} = 66,6 \text{ kg} \approx 70 \text{ kg}$$

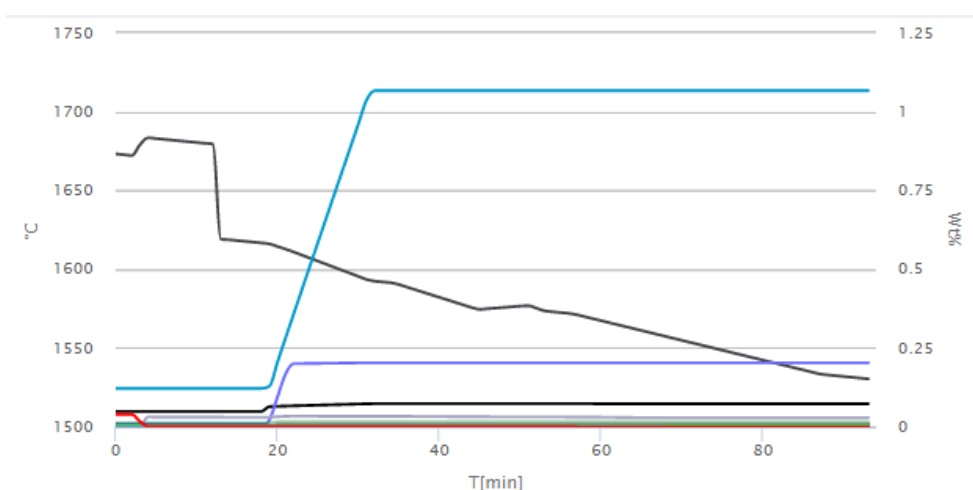


Se esperan unos 10 minutos para que se produzca una buena homogeneización y mezcla de aleantes y acero, una vez transcurridos los 10 minutos, el siguiente paso es trasladar la cuchara al horno de arco eléctrico a través del puente grúa 1 y el carro porta cucharas. En el horno cuchara de arco eléctrico se somete el baño de acero a un recalentamiento por arco eléctrico con flujo de Argón simultáneo que permite reducir la velocidad de enfriamiento del baño de acero y una mezcla óptima del metal y los aleantes adicionados en el proceso CAS-OB. El acero líquido se mantiene en el horno cuchara durante 20 minutos reales para después ser enviado al tanque desgasificador para proceder a realizar la desgasificación del acero. Utilizaremos un ratio de flujo de Argón de 0,75 para conseguir una buena agitación y generaremos un vacío de 0,001 atm, el mínimo que nos permite la simulación, para provocar la desgasificación óptima se mantendrá la cuchara en el tanque desgasificador durante unos 30 minutos.

En ese momento el acero líquido estará listo para ser solidificado, por lo que es enviado a la máquina de colada de planchones, los resultados tras esta primera simulación se muestran a continuación:

Nivel de usuario Estudiante universitario Grado de acero Acero para tuberías de distribución de gas Registro de eventos	<table><thead><tr><th></th><th></th><th></th><th>Objetivo</th></tr></thead><tbody><tr><td>Tiempo</td><td>01H:33M</td><td>✓</td><td>01H:33M +/-5M</td></tr><tr><td>Temperatura</td><td>1530°C</td><td>✓</td><td>1527-1552°C</td></tr><tr><td>Inclusiones</td><td>Muy bajo</td><td>✓</td><td>Muy bajo</td></tr><tr><td>Máquina de colada</td><td>Máquina de colada de planchones</td><td>✓</td><td>Máquina de colada de planchones</td></tr><tr><td>Costo Total</td><td>19.76/t</td><td></td><td></td></tr></tbody></table>				Objetivo	Tiempo	01H:33M	✓	01H:33M +/-5M	Temperatura	1530°C	✓	1527-1552°C	Inclusiones	Muy bajo	✓	Muy bajo	Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✓	Máquina de colada de planchones	Costo Total	19.76/t		
			Objetivo																						
Tiempo	01H:33M	✓	01H:33M +/-5M																						
Temperatura	1530°C	✓	1527-1552°C																						
Inclusiones	Muy bajo	✓	Muy bajo																						
Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✓	Máquina de colada de planchones																						
Costo Total	19.76/t																								

Figura 55. Resumen final de datos para el acero para tuberías de distribución de gas tras la primera simulación



	Colada	Final		Min	Máx
C	0.0729	0.0700	✓	0.0600	0.0800
Si	0.2029	0.1800	✓	0.1300	0.2300
Mn	1.0664	1.0500	✓	1.0000	1.1000
P	0.0097	-	✗	-	0.0080
S	0.0010	-	✓	-	0.0030
Cr	0.0100	-	✓	-	0.0600
Al	0.0286	0.0300	✓	0.0250	0.0350
B	0.0001	-	✓	-	0.0050
Ni	0.0100	-	✓	-	0.0500
Nb	0.0153	0.0150	✓	0.0120	0.0180
Ti	0.0004	-	✓	-	0.0100
V	0.0000	-	✓	-	0.0100
Mo	0.0020	-	✓	-	0.0100
Ca	0.0022	-	✓	0.0010	0.0050
N	0.0029	-	✓	-	0.0045
H	0.0001	-	✓	-	0.0002
O	0.0000	-	✓	-	0.0007

Figura 56. Composición final después de la primera simulación del grado de acero para tuberías de distribución de gas

Como se puede ver, la composición final obtenida en la simulación para el acero de tuberías de distribución de gas no es correcta (figura 56). El contenido de fósforo no cumple con los requisitos de composición, el contenido de fósforo obtenido es de 0,0097% y no debe superar el 0,008%. Analizando los aditivos incorporados en el baño de acero, es fácil prever de donde viene ese aumento



excesivo de contenido de fósforo, y su procedencia no es otra que el ferromanganeso de bajo carbono, en cuya composición contiene un 0,25% de fósforo. Este problema puede solucionarse reduciendo la cantidad adicionada de ferromanganeso de bajo carbono y sustituyéndola por ferromanganeso de alta pureza, de esta forma no aumentaremos el contenido de fósforo por encima de lo requerido y conseguiremos aumentar el contenido de manganeso hasta el nivel exigido. Modificando esta adición también habrá que modificar la de recarburante, ya que adicionando menos ferromanganeso de bajo carbono también añadiremos menos carbono y puede que no consigamos el contenido en carbono adecuado para el grado de acero.

Vamos a determinar la cantidad óptima de ferromanganeso de bajo carbono a adicionar para no elevar el contenido de fósforo excesivamente. Sabemos que con 3000 kg de ferromanganeso de bajo carbono, el contenido de fósforo se eleva desde un 0,007% hasta un 0,0097%, y el contenido máximo de fósforo en este acero debe ser de 0,008%.

Despejamos de la siguiente expresión el valor de m_{aditivo} para conocer la masa de ferromanganeso de bajo carbono a adicionar para que el incremento de fósforo provocado por la adición del ferromanganeso de bajo carbono no sea superior a un 0,00075%.

$$\Delta\%P = \frac{m_{\text{aditivo}} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} =$$
$$\frac{m_{\text{aditivo}} \cdot 0,25\% \cdot 98\%}{100 \cdot 250000} = 0,00075\% \text{ C} \rightarrow m_{\text{aditivo}} \approx 760 \text{ kg}$$

La cantidad de fósforo tras esta adición será, la cantidad inicial de fósforo previa a la adición, en este caso es de 0,0075% C, más el aumento provocado por la adición de ferromanganeso de bajo carbono:

$$[\%P]_f = 0,007 + 0,00075 = 0,00775\% \text{ C} < 0,008\%$$

De esta manera nos aseguramos que el contenido de fósforo no llega al contenido máximo permitido (0,008% P) para este grado de acero.

Por tanto, la nueva cantidad de ferromanganeso de bajo carbono a adicionar será de 760 kg.



Ahora vamos a determinar la cantidad de carbono y manganeso que se incorporan mediante la adición de 760 kg de ferromanganeso de bajo carbono.

Incremento de carbono:

$$\Delta\%C = \frac{\text{aditivo} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} = \frac{760 \cdot 0,85\% \cdot 95}{100 \cdot 250000} = 2,45 \times 10^{-3}\% \text{ C}$$

La cantidad de carbono tras esta adición será:

$$[\%C]_f = 0,05 + 2,45 \times 10^{-3} = 0,0524\% \text{ C}$$

Este valor no llega al contenido mínimo de carbono requerido (0,06% C) para este grado de acero, por lo que es necesario incrementar aún más la cantidad de recarburante a incorporar:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,075 - 0,0524) \cdot 250000}{98\% \cdot 95\%} = 60,68 \text{ kg} \approx 60 \text{ kg}$$

Incremento de manganeso:

$$\Delta\%Mn = \frac{\text{aditivo} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} = \frac{760 \cdot 81,5\% \cdot 95}{100 \cdot 250000} = 0,235\% \text{ Mn}$$

La cantidad de carbono tras esta adición será:

$$[\%Mn]_f = 0,12 + 0,235 = 0,355\% \text{ Mn}$$

Por tanto, falta por determinar la cantidad de ferromanganeso de alta pureza que se debe incorporar al baño de acero para conseguir el contenido de manganeso exigido, es decir, incrementar el contenido en manganeso desde un 0,355% a un 1,05%

- Adición de ferromanganeso de alta pureza para incrementar el contenido de manganeso hasta el contenido requerido

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (1,05 - 0,355) \cdot 250000}{49\% \cdot 95\%} = 3732,54 \text{ kg} \approx 3730 \text{ kg}$$

Ahora realizamos de nuevo la simulación, con los mismos valores que en la primera simulación, salvo los nuevos valores calculados de las adiciones de



ferromanganeso de bajo carbono, recarburante y ferromanganeso de alta pureza. En esta nueva simulación, tanto los objetivos previos a la simulación como la composición inicial se mantienen constantes. Los resultados finales del tratamiento de metalurgia secundario en esta segunda simulación del acero para tubería de distribución de gas son los siguientes:

Nivel de usuario Estudiante universitario Grado de acero Acero para tuberías de distribución de gas <input type="button" value="Registro de eventos"/>		Objetivo	
Tiempo	01H:37M	✓	01H:36M +/-5M
Temperatura	1529°C	✓	1527-1552°C
Inclusiones	Muy bajo	✓	Muy bajo
Máquina de colada	Máquina de colada de planchones	✓	Máquina de colada de planchones
Costo Total	38.35/t		

Figura 57. Resumen final de datos para el acero para tuberías de distribución de gas después de la segunda simulación

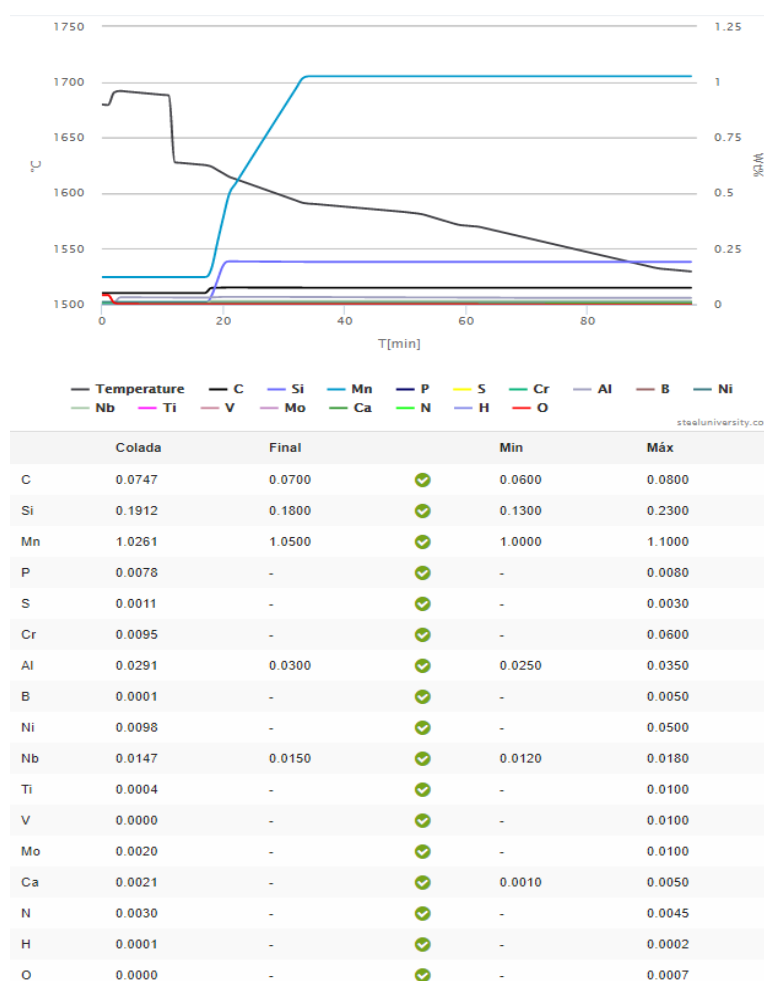


Figura 58. Composición tras la segunda simulación del grado de acero para tuberías de distribución de gas



Tras esta segunda simulación, todos los objetivos previos se cumplen (figura 57), el tiempo de tratamiento y la temperatura final están en el rango de valores exigido, el nivel de inclusiones final es muy bajo, y la composición del acero final es la adecuada, el contenido de cada elemento en el acero líquido final es el apropiado (figura 58). El coste final de este grado de acero es de 38,35\$ por tonelada.

Los principales costes asociados a los aditivos que hemos empleado en la simulación del acero para tuberías de distribución de gas, son los siguientes:

Tabla 13. Costes asociados a los aditivos para el grado de acero para tuberías de distribución de gas

PROCESO	COSTE
ADICIÓN DE 300 KG DE GRANALLAS DE ALUMINIO	420 \$
ADICIÓN DE 60 KG DE RECARBURANTE	17 \$
ADICIÓN DE 760 KG DE FERROMANGANESO DE BAJO CARBONO	638 \$
ADICIÓN DE 3730 KG DE FERROMANGANESO DE ALTA PUREZA	6789 \$
ADICIÓN DE 610 KG DE FERRO SILICIO 75	470 \$
ADICIÓN DE 60 KG DE FERRO NIOBIO	588 \$
ADICIÓN DE 70 KG DE SILICIO DE CALCIO EN ALAMBRE	108 \$
COSTE TOTAL = 9030 \$	

El acero final obtenido en la segunda simulación cumple todos los requisitos exigidos en el grado de acero para tuberías destinadas a la distribución de gas y puede ser empleado para esta aplicación. Respecto al coste final del acero por cada tonelada, es un coste muy competitivo, la elección de granallas de aluminio en lugar de alambre de aluminio, y del silicio de calcio en alambre en lugar de silicio de calcio en polvo han permitido rebajar el coste de forma considerable, y ajustar aún más el precio en el simulador es muy complicado, por lo que el resultado obtenido es muy bueno.



7.6.4 Simulación del acero para construcción mecánica

El grado de acero para construcción mecánica requiere ciertas adiciones, principalmente de molibdeno y cromo, así como la eliminación de hidrogeno para conseguir un acero de gran resistencia y tenacidad.

El resumen de datos generado por el simulador para este grado de acero es el siguiente:

Grado elegido Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140) Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 100000kg Nivel de inclusión requerido: Bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de palanquillas	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 10 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1675°C Temperatura final en máquina de colada: 1558-1578°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.1300</td><td>-</td><td>✘ 0.3800</td><td>0.4500</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0060</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.4000</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1200</td><td>-</td><td>✘ 0.6000</td><td>0.9000</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0070</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0080</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✘ 0.9000</td><td>1.2000</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✘ 0.0150</td><td>0.0300</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.1000</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.3000</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>-</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>-</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✘ 0.1500</td><td>0.3000</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>-</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0030</td><td>-</td><td>✔ -</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0004</td><td>-</td><td>✘ -</td><td>0.0003</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0400</td><td>-</td><td>✘ -</td><td>0.0005</td></tr></tbody></table>		Colada	Final	Min	Máx	C	~0.1300	-	✘ 0.3800	0.4500	Si	~0.0060	-	✔ -	0.4000	Mn	~0.1200	-	✘ 0.6000	0.9000	P	~0.0070	-	✔ -	0.0350	S	~0.0080	-	✔ -	0.0350	Cr	~0.0100	-	✘ 0.9000	1.2000	Al	~0.0000	-	✘ 0.0150	0.0300	B	~0.0001	-	✔ -	0.0050	Ni	~0.1000	-	✔ -	0.3000	Nb	~0.0000	-	✔ -	-	Ti	~0.0000	-	✔ -	-	V	~0.0000	-	✔ -	0.0100	Mo	~0.0020	-	✘ 0.1500	0.3000	Ca	~0.0000	-	✔ -	-	N	~0.0030	-	✔ -	0.0050	H	~0.0004	-	✘ -	0.0003	O	~0.0400	-	✘ -	0.0005
	Colada	Final	Min	Máx																																																																																								
C	~0.1300	-	✘ 0.3800	0.4500																																																																																								
Si	~0.0060	-	✔ -	0.4000																																																																																								
Mn	~0.1200	-	✘ 0.6000	0.9000																																																																																								
P	~0.0070	-	✔ -	0.0350																																																																																								
S	~0.0080	-	✔ -	0.0350																																																																																								
Cr	~0.0100	-	✘ 0.9000	1.2000																																																																																								
Al	~0.0000	-	✘ 0.0150	0.0300																																																																																								
B	~0.0001	-	✔ -	0.0050																																																																																								
Ni	~0.1000	-	✔ -	0.3000																																																																																								
Nb	~0.0000	-	✔ -	-																																																																																								
Ti	~0.0000	-	✔ -	-																																																																																								
V	~0.0000	-	✔ -	0.0100																																																																																								
Mo	~0.0020	-	✘ 0.1500	0.3000																																																																																								
Ca	~0.0000	-	✔ -	-																																																																																								
N	~0.0030	-	✔ -	0.0050																																																																																								
H	~0.0004	-	✘ -	0.0003																																																																																								
O	~0.0400	-	✘ -	0.0005																																																																																								

COMENZAR SIMULACIÓN ▶

Figura 59. Resumen de datos previos a la simulación para el grado de acero para construcción mecánica

En esta simulación, se nos indica que los procesos de metalurgia secundaria a realizar en la simulación del acero para construcción mecánica deberían estar en un intervalo de tiempo que va desde 1 hora y 55 minutos hasta dos horas y 5 minutos, medido en tiempo real. Los elementos que se deben modificar para obtener una composición adecuada para este grado de acero son el C, Mn, Cr, Al, Mo, H y O. En este caso se empleará para la colada la máquina de palanquillas, el acero líquido debe llegar a un temperatura de entre 1558 y 1578°C.

El carbono, manganeso, aluminio y sobretodo el cromo y el manganeso deben elevar su contenido en el acero final listo para solidificar si queremos cumplir las



exigencias marcadas para este grado de acero, y los contenidos en hidrogeno y oxígeno deben ser reducidos.

Ahora daremos comienzo a la simulación de la metalurgia secundaria en este grado de acero.

Lo primero como en todas las simulaciones realizadas es bascular el acero desde el convertidor a la cuchara, en el momento de la colada realizaremos una adición de aluminio en forma de granallas para provocar la reacción con el oxígeno disuelto en el acero y provocar la desoxidación del baño de acero. La cantidad de aluminio a adicionar será determinada a continuación:

El contenido inicial de oxígeno es de 0,04% (400 ppm), el aluminio necesario para la desoxidación será:

$$\%Al \approx \frac{54}{48} \cdot 0,04 = 0,045\%$$

El aluminio total requerido es la suma del aluminio necesario para la oxidación y el aluminio final de la colada, por tanto:

$$\text{Aluminio total requerido} = 0,045 + 0 = 0,045\%$$

Ahora determinamos la masa de adición de aluminio requerida para desoxidar el acero para tuberías de distribución de gas:

$$m_{Al} = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot 0,045 \cdot 100000}{98\% \cdot 63\%} = 72,8$$

$$\text{kg} \approx 80 \text{ kg}$$

Por tanto la cantidad de aluminio a incorporar en el baño de acero para conseguir una desoxidación óptima será de unos 80 kg.

A continuación llevaremos la cuchara hasta el horno cuchara mediante los carros porta-cuchara y el puente grúa 1. En el horno cuchara realizaremos las adiciones necesarias para ajustar la composición del baño, realizando las adiciones en el horno cuchara reduciremos la velocidad de enfriamiento provocada por dichas adiciones debido al calor generado por el arco eléctrico creado en el horno. Las adiciones a realizar son las siguientes:



La adición de aluminio al baño de acero provoca una reacción entre el aluminio y el oxígeno disuelto en el acero, el resultado es la formación de partículas de óxido de aluminio (Al_2O_3). Una buena agitación del baño de acero es muy importante para que estas partículas lleguen a la escoria donde deben quedar atrapadas, y de esta forma conseguir eliminar el oxígeno inicial presente en el acero.

- Adición de ferromanganeso de alto carbono para elevar el contenido de carbono y de manganeso de un 0,12% a un 0,75% aproximadamente

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,75 - 0,12) \cdot 100000}{76,5\% \cdot 95\%} = 866,87 \text{ kg} \approx 860 \text{ kg}$$

La cantidad de carbono incorporado con la adición del ferromanganeso de alto carbono es:

$$\Delta\%C = \frac{\text{madio} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} = \frac{866,87 \cdot 6,7\% \cdot 95}{100 \cdot 100000} = 0,055\% \text{ C}$$

La cantidad de carbono final será la cantidad inicial más este aumento provocado por la adición de ferromanganeso de alto carbono:

$$[\%C]_f = 0,055 + 0,13 = 0,185\% \text{ C}$$

- Adición de recarburante
Mediante la adición del ferromanganeso de alto carbono incrementamos la cantidad de carbono también, por tanto, ahora la adición de recarburante a realizar deberá tener un valor que permita elevar el contenido de carbono desde un 0,185% a un 0,38% aproximadamente:

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,38 - 0,185) \cdot 100000}{98\% \cdot 95\%} = 209,45 \text{ kg} \approx 210 \text{ kg}$$

- Adición de ferro cromo para aumentar el contenido de cromo desde un 0,01% hasta un 1% aproximadamente

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (1 - 0,01) \cdot 100000}{66,5\% \cdot 99\%} = 1503,76 \text{ kg} \approx 1500 \text{ kg}$$



- Adición de ferro molibdeno para elevar el molibdeno desde un 0,002% a un 0,185%

$$m = \frac{100 \cdot \Delta\%X \cdot \text{masa de acero en la cuchara}}{\%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}} = \frac{100 \cdot (0,185 - 0,002) \cdot 100000}{70\% \cdot 100\%} = 257,14 \text{ kg} \approx 260 \text{ kg}$$

Tras las adiciones aumentamos el nivel de potencia eléctrica a 5 durante unos 10 minutos para reducir la velocidad de enfriamiento del acero. El flujo de Argón lo elevamos a un ratio de 0,5 durante todo el tratamiento en el horno para que se produzca una agitación óptima y conseguir de esta forma una buena mezcla entre el acero y las adiciones, tras unos 30 minutos detenemos la operación en el horno y enviamos la cuchara al proceso de desgasificación por recirculación. La cuchara sale del horno de arco mediante el carro porta-cuchara, a continuación el puente grúa alza la cuchara y la transporta hasta el carro porta-cuchara que llevará la cuchara hasta la posición del sistema de desgasificación por recirculación (RH). Mediante el vacío generado y la acción del argón el acero asciende por el primer snorkel del sistema de recirculación, el acero líquido con todos los elementos adicionados es desgasificado en fracciones y vuelve a la cuchara a través del segundo snorkel debido a la acción de la gravedad. El sistema de desgasificación por recirculación permite reducir el contenido de hidrógeno principalmente, aunque también el oxígeno disuelto que pueda permanecer en el baño. Para que la desgasificación sea eficiente, la cuchara debe permanecer en el sistema RH durante un determinado período de tiempo que se calcula de forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$t = -\frac{1}{kH} \cdot \ln \left[\frac{[\%H]_f - [\%H]_{eq}}{[\%H]_i - [\%H]_{eq}} \right] = -\frac{1}{0,13} \cdot \ln \left[\frac{0,0001 - 0,00005}{0,0004 - 0,00005} \right] = 15 \text{ min}$$

Por último, el acero líquido ya estará desgasificado y tendrá la composición adecuada para los requerimientos exigidos, por lo tanto, está preparado para ser solidificado en la máquina de colada de palanquillas, a donde es transportada mediante el puente grúa dos.



Los resultados finales de la simulación, en cuanto a costes totales y composición son:

Nivel de usuario		Objetivo	
Estudiante universitario			
Grado de acero			
Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140)			
Registro de eventos			
Tiempo	01H:12M	✓	01H:10M +/-5M
Temperatura	1571°C	✓	1558-1578°C
Inclusiones	Muy bajo	✓	Bajo
Máquina de colada	Máquina de colada de palanquillas	✓	Máquina de colada de palanquillas
Costo Total	68.43/t		

Figura 60. Resumen de datos final del acero para construcción mecánica después de la primera simulación

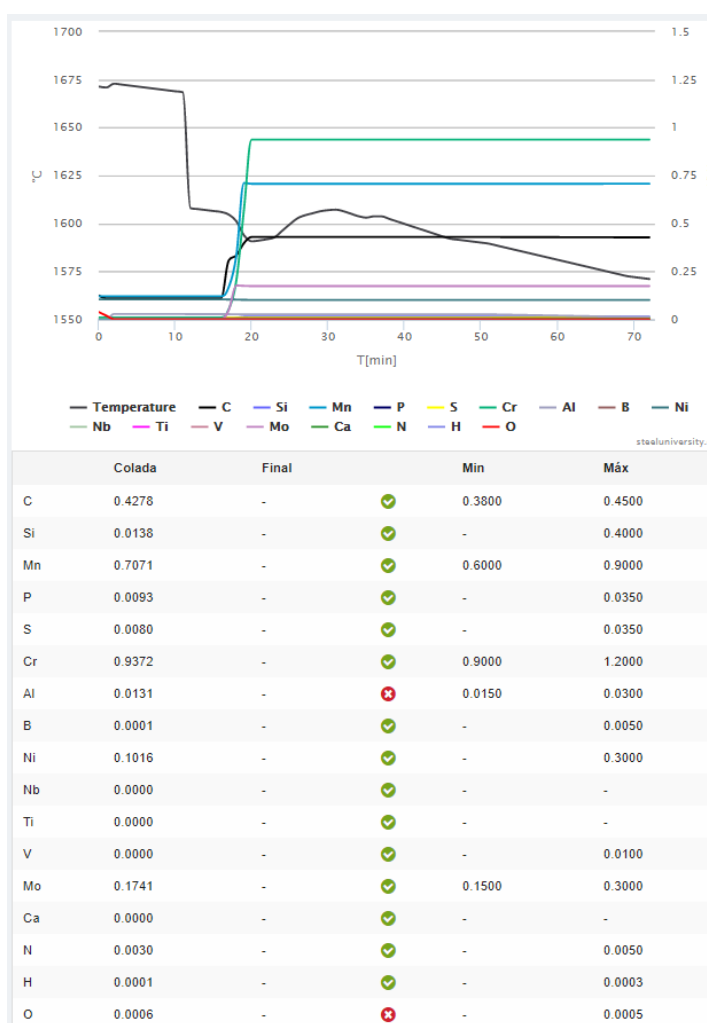


Figura 61. Composición tras la primera simulación del acero para construcción mecánica

Los resultados de la primera simulación muestran que los objetivos previstos han sido cumplidos (figura 60), pero la composición final del acero no es la óptima (figura 61), y no cumple con las exigencias de este grado de acero. El contenido



el aluminio en el acero final (0,0131%) no es lo suficientemente alto, debería de estar en un rango comprendido entre 0,015% y 0,03%, además el contenido de oxígeno (0,0006%) es superior al contenido máximo permitido (0,0005%). Analizados estos defectos en la composición, el problema debería solucionarse adicionando una cantidad mayor de aluminio, de este modo incrementaremos el contenido final de aluminio y favoreceremos la desoxidación para conseguir reducir el contenido final de oxígeno disuelto en el acero. Como las diferencias entre el contenido exigido y el obtenido no son muy grandes, vamos a realizar una adición un poco mayor de aluminio, 90 kg en lugar de 80, y otra adición de ferro silicio 45, un aleación que contiene un 2% de aluminio, lo que permite incorporar aluminio al baño de acero de forma más económica que mediante las granallas de aluminio, y un incremento del silicio no perjudica en nada el acero final. Vamos a determinar la cantidad de ferro silicio 45 a adicionar para incrementar el contenido de aluminio desde un 0,0131% a un 0,02%.

Vamos a despejar el valor de m_{aditivo} de la siguiente expresión:

$$\Delta\%Al = \frac{m_{\text{aditivo}} \cdot \%X \text{ en la ferroaleación} \cdot \text{tasa de recuperación de X}}{100 \cdot \text{masa de acero en la cuchara}} =$$
$$\frac{m_{\text{aditivo}} \cdot 2\% \cdot 90\%}{100 \cdot 100000} = (0,02 - 0,0131)\% Al$$

La cantidad de ferrosilicio 45 a incorporar será:

$$m_{\text{aditivo}} = 383,3 \text{ kg} \approx 390 \text{ kg}$$

Para esta segunda simulación, el simulador cambia el rango de tiempo de simulación, el resto de parámetros y composición inicial se mantienen constantes, como se puede ver en la figura 62.



Grado elegido Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140) Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 100000kg Nivel de inclusión requerido: Bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de palanquillas	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 24 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1675°C Temperatura final en máquina de colada: 1558-1578°C	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Colada</th> <th>Final</th> <th></th> <th>Min</th> <th>Máx</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>~0.1300</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.3800</td><td>0.4500</td></tr> <tr><td>Si</td><td>~0.0060</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.4000</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>~0.1200</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.6000</td><td>0.9000</td></tr> <tr><td>P</td><td>~0.0070</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0350</td></tr> <tr><td>S</td><td>~0.0080</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0350</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.9000</td><td>1.2000</td></tr> <tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.0150</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>~0.1000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.3000</td></tr> <tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.1500</td><td>0.3000</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>N</td><td>~0.0030</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr> <tr><td>H</td><td>~0.0004</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0003</td></tr> <tr><td>O</td><td>~0.0400</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr> </tbody> </table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~0.1300	-	✘	0.3800	0.4500	Si	~0.0060	-	✔	-	0.4000	Mn	~0.1200	-	✘	0.6000	0.9000	P	~0.0070	-	✔	-	0.0350	S	~0.0080	-	✔	-	0.0350	Cr	~0.0100	-	✘	0.9000	1.2000	Al	~0.0000	-	✘	0.0150	0.0300	B	~0.0001	-	✔	-	0.0050	Ni	~0.1000	-	✔	-	0.3000	Nb	~0.0000	-	✔	-	-	Ti	~0.0000	-	✔	-	-	V	~0.0000	-	✔	-	0.0100	Mo	~0.0020	-	✘	0.1500	0.3000	Ca	~0.0000	-	✔	-	-	N	~0.0030	-	✔	-	0.0050	H	~0.0004	-	✘	-	0.0003	O	~0.0400	-	✘	-	0.0005
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~0.1300	-	✘	0.3800	0.4500																																																																																																									
Si	~0.0060	-	✔	-	0.4000																																																																																																									
Mn	~0.1200	-	✘	0.6000	0.9000																																																																																																									
P	~0.0070	-	✔	-	0.0350																																																																																																									
S	~0.0080	-	✔	-	0.0350																																																																																																									
Cr	~0.0100	-	✘	0.9000	1.2000																																																																																																									
Al	~0.0000	-	✘	0.0150	0.0300																																																																																																									
B	~0.0001	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
Ni	~0.1000	-	✔	-	0.3000																																																																																																									
Nb	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
Ti	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
V	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Mo	~0.0020	-	✘	0.1500	0.3000																																																																																																									
Ca	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
N	~0.0030	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
H	~0.0004	-	✘	-	0.0003																																																																																																									
O	~0.0400	-	✘	-	0.0005																																																																																																									

COMENZAR SIMULACIÓN

Figura 62. Resumen de datos previos a la segunda simulación para el acero de construcción mecánica

Los resultados tras la segunda simulación se pueden ver en las siguientes figuras:

Nivel de usuario Estudiante universitario Grado de acero Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Objetivo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo</td> <td>01H.26M</td> <td>✔</td> <td>01H.24M +/-5M</td> </tr> <tr> <td>Temperatura</td> <td>1568°C</td> <td>✔</td> <td>1558-1578°C</td> </tr> <tr> <td>Inclusiones</td> <td>Muy bajo</td> <td>✔</td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td>Máquina de colada</td> <td>Máquina de colada de palanquillas</td> <td>✔</td> <td>Máquina de colada de palanquillas</td> </tr> <tr> <td>Costo Total</td> <td>74.16/t</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Objetivo	Tiempo	01H.26M	✔	01H.24M +/-5M	Temperatura	1568°C	✔	1558-1578°C	Inclusiones	Muy bajo	✔	Bajo	Máquina de colada	Máquina de colada de palanquillas	✔	Máquina de colada de palanquillas	Costo Total	74.16/t		
			Objetivo																						
Tiempo	01H.26M	✔	01H.24M +/-5M																						
Temperatura	1568°C	✔	1558-1578°C																						
Inclusiones	Muy bajo	✔	Bajo																						
Máquina de colada	Máquina de colada de palanquillas	✔	Máquina de colada de palanquillas																						
Costo Total	74.16/t																								

Registro de eventos

Figura 63. Resultados finales tras la segunda simulación del grado de acero para construcción mecánica

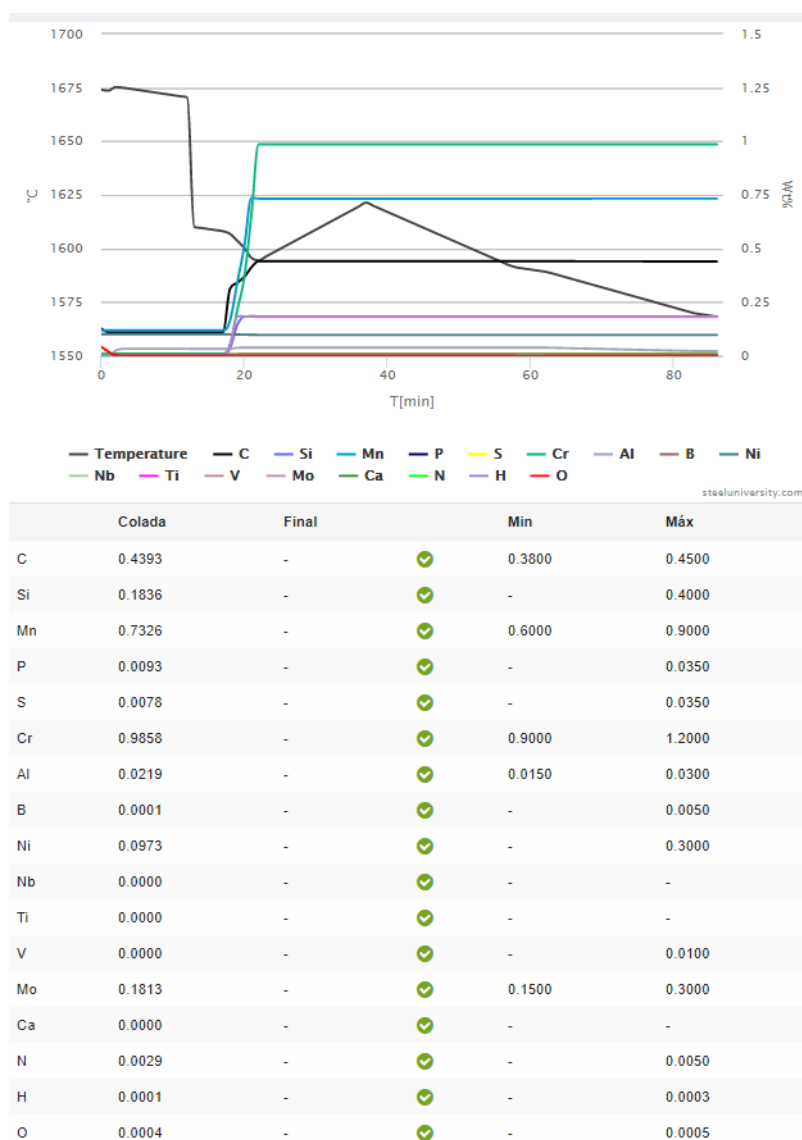


Figura 64. Composición final obtenida tras la segunda simulación del acero para construcción mecánica

Como se puede ver en las figuras 63 y 64, en la segunda simulación se cumplen todos los objetivos previos a la simulación. Los rangos de tiempo y temperatura final del acero de la simulación están dentro de los rangos fijados en el resumen previo a la simulación, además el nivel de inclusiones obtenido es muy bajo, y el nivel exigido era bajo. En este caso, la composición final si es la adecuada, y mediante las modificaciones realizadas tras la primera simulación y la adición del ferro silicio 45 hemos obtenido la composición exigida por el grado de acero para construcción mecánica.



Los principales costes asociados a los elementos incorporados al baño de acero para la fabricación de acero para construcción mecánica son los siguientes:

Tabla 14. Costes asociados a los aditivos para el grado de acero para construcción mecánica

PROCESO	COSTE
ADICIÓN DE 90 KG DE GRANALLAS DE ALUMINIO	126 \$
ADICIÓN DE 210 KG DE RECARBURANTE	59 \$
ADICIÓN DE 860 KG DE FERROMANGANESO DE ALTO CARBONO	421 \$
ADICIÓN DE 390 KG DE FERRO SILICIO 45	246 \$
ADICIÓN DE 1500 KG DE FERRO CROMO DE ALTO CARBONO	1890 \$
ADICIÓN DE 260 KG DE FERRO MOLIBDENO	4368 \$
COSTE TOTAL = 7110 \$	

El acero obtenido tras la segunda simulación cumple los requerimientos exigidos para el grado de acero para construcción mecánica, respecto al coste, para reducir el coste final al mínimo se han seleccionado una adición de granallas de aluminio en lugar de alambre de aluminio, al igual que en las simulaciones para el resto de grados de acero. Además como no era suficiente esa adición de aluminio, se decidió incorporar más aluminio mediante una adición de ferro silicio 45, que contiene un 2% de aluminio, para aumentar el aluminio en un pequeño porcentaje a un coste menor del que se hubiera conseguido si se adicionará más aluminio en forma de granallas de aluminio. Además hay que tener en cuenta que si se hubiera añadido una cantidad mayor de granallas de aluminio habríamos incrementado el contenido de aluminio por encima del contenido óptimo. Existen ciertos elementos cuyo contenido podría ser modificado para intentar reducir un poco el coste final por tonelada, es el caso del carbono, cuyo contenido final está próximo al contenido máximo exigido para este grado de acero, por lo que se podría reducir la cantidad de recarburante adicionada y reducir un poco el coste. En vista del contenido final obtenido, también puede ser buena idea reducir la adición de ferro silicio 45 de esta forma



intentar ajustar un poco más los contenidos de aluminio y oxígeno en el acero líquido.

Las adiciones a realizar en esta nueva simulación son las mismas que en la anterior, salvo dos modificaciones para las cantidades a añadir de recarburante y ferro silicio 45. Las nuevas adiciones de recarburante y ferro silicio 45 son:

- Adición de 180 kg de recarburante en lugar de 210 kg
- Adición de 200kg de ferro silicio 45 en lugar de 390 kg

Para esta tercera simulación, los datos iniciales son iguales que en la segunda simulación, solo varía el período de tiempo a tratar el acero líquido, como se puede observar en la figura 65, ahora el rango de tiempo en el que se debe realizar el tratamiento está entre 1 hora y 8 minutos, y 1 hora y 18 minutos.

Grado elegido Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140) Masa del baño de acero en la cuchara: ~ 100000kg Nivel de inclusión requerido: Bajo La cuchara es requerida en Máquina de colada de palanquillas	Tiempo transcurrido hasta que la cuchara es requerida en la máquina de colada 1 hr 13 mins ±5 mins. Temperatura de la colada: ~ 1675°C Temperatura final en máquina de colada: 1558-1578°C	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Colada</th><th>Final</th><th></th><th>Min</th><th>Máx</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>~0.1300</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.3800</td><td>0.4500</td></tr><tr><td>Si</td><td>~0.0060</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.4000</td></tr><tr><td>Mn</td><td>~0.1200</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.6000</td><td>0.9000</td></tr><tr><td>P</td><td>~0.0070</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>S</td><td>~0.0080</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0350</td></tr><tr><td>Cr</td><td>~0.0100</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.9000</td><td>1.2000</td></tr><tr><td>Al</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.0150</td><td>0.0300</td></tr><tr><td>B</td><td>~0.0001</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>Ni</td><td>~0.1000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.3000</td></tr><tr><td>Nb</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>Ti</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>V</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0100</td></tr><tr><td>Mo</td><td>~0.0020</td><td>-</td><td>✘</td><td>0.1500</td><td>0.3000</td></tr><tr><td>Ca</td><td>~0.0000</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>N</td><td>~0.0030</td><td>-</td><td>✔</td><td>-</td><td>0.0050</td></tr><tr><td>H</td><td>~0.0004</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0003</td></tr><tr><td>O</td><td>~0.0400</td><td>-</td><td>✘</td><td>-</td><td>0.0005</td></tr></tbody></table>		Colada	Final		Min	Máx	C	~0.1300	-	✘	0.3800	0.4500	Si	~0.0060	-	✔	-	0.4000	Mn	~0.1200	-	✘	0.6000	0.9000	P	~0.0070	-	✔	-	0.0350	S	~0.0080	-	✔	-	0.0350	Cr	~0.0100	-	✘	0.9000	1.2000	Al	~0.0000	-	✘	0.0150	0.0300	B	~0.0001	-	✔	-	0.0050	Ni	~0.1000	-	✔	-	0.3000	Nb	~0.0000	-	✔	-	-	Ti	~0.0000	-	✔	-	-	V	~0.0000	-	✔	-	0.0100	Mo	~0.0020	-	✘	0.1500	0.3000	Ca	~0.0000	-	✔	-	-	N	~0.0030	-	✔	-	0.0050	H	~0.0004	-	✘	-	0.0003	O	~0.0400	-	✘	-	0.0005
	Colada	Final		Min	Máx																																																																																																									
C	~0.1300	-	✘	0.3800	0.4500																																																																																																									
Si	~0.0060	-	✔	-	0.4000																																																																																																									
Mn	~0.1200	-	✘	0.6000	0.9000																																																																																																									
P	~0.0070	-	✔	-	0.0350																																																																																																									
S	~0.0080	-	✔	-	0.0350																																																																																																									
Cr	~0.0100	-	✘	0.9000	1.2000																																																																																																									
Al	~0.0000	-	✘	0.0150	0.0300																																																																																																									
B	~0.0001	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
Ni	~0.1000	-	✔	-	0.3000																																																																																																									
Nb	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
Ti	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
V	~0.0000	-	✔	-	0.0100																																																																																																									
Mo	~0.0020	-	✘	0.1500	0.3000																																																																																																									
Ca	~0.0000	-	✔	-	-																																																																																																									
N	~0.0030	-	✔	-	0.0050																																																																																																									
H	~0.0004	-	✘	-	0.0003																																																																																																									
O	~0.0400	-	✘	-	0.0005																																																																																																									

Figure 65. Resumen inicial de la tercera simulación del acero para construcción mecánica

Los resultados obtenidos tras esta nueva simulación son los siguientes (figuras 66 y 67):



Nivel de usuario	Objetivo	
Estudiante universitario		
Grado de acero	Tiempo 01H:15M	✓ 01H:13M +/-5M
Acero para construcción mecánica (por ej.: AISI 4140)	Temperatura 1563°C	✓ 1558-1578°C
	Inclusiones Muy bajo	✓ Bajo
	Máquina de colada Máquina de colada de palanquillas	✓ Máquina de colada de palanquillas
	Costo Total 70.18/t	

Figure 66. Resumen final tras la tercera simulación del acero para construcción mecánica



Figure 67. Composición final del acero líquido después de la última simulación del acero para construcción mecánica

Los resultados obtenidos en esta tercera simulación cumplen todas las exigencias, rango de temperatura y tiempo de tratamiento, nivel de inclusiones, y por supuesto composición final. Además también se ha conseguido reducir el



coste final del acero líquido, que era el objetivo de esta tercera simulación. La reducción de coste conseguida es de casi 4\$ (74,16\$ en la segunda simulación y 74,18\$/t en esta última simulación) por tonelada de acero líquido producida, por lo que la simulación ha sido un éxito y el ahorro de coste logrado es muy significativo. Para una compañía siderúrgica, cuya producción de acero líquido anual este en una cuantía de unos 5 millones de toneladas de acero líquido, el ahorro que permitiría la diferencia de coste conseguida con esta última simulación sería de casi 20 millones de dólares. En definitiva el resultado es esclarecedor y la última simulación realizada sería la más óptima para fabricar un grado de acero para construcción mecánica con un coste mínimo.

8. CONCLUSIONES

El acero es un metal que presenta unas propiedades mecánicas muy buenas y esto, le permite ser usado en multitud de aplicaciones. A medida que pasan los años, las especificaciones del acero requeridas por los consumidores de acero son cada vez más exigentes y rigurosas, el acero debe cumplir una serie de requisitos y a un precio asequible.

En base a esto, se han ido desarrollando diferentes procesos de tratamiento para el acero líquido obtenido en hornos eléctricos y convertidores. Estos procesos de tratamiento, denominados procesos de metalurgia secundaria, están basados en el ajuste en la composición del acero líquido, el ajuste de su temperatura y sobre todo la eliminación de gases disueltos en el acero que son perjudiciales para la propiedades estructurales del acero. El desarrollo de estos procesos ha supuesto un gran avance para la fabricación de aceros con unas propiedades excelentes, además permiten reducir los costes y aumentar la productividad, algo muy importante en el mundo actual.



Respecto a nuestro estudio, se ha llevado a cabo la simulación de diferentes procesos de metalurgia secundaria para conseguir obtener unos grados de acero determinados dependiendo de su futura aplicación. En función del grado de acero requerido, el ajuste de composición a realizar es diferente, el contenido de ciertos elementos debe ser modificado dependiendo de las propiedades mecánicas deseadas. El ajuste de temperatura también es diferente para cada grado de acero, la máquina de colada a usar cambia y la temperatura final del acero previo a la solidificación también varía. El primer paso a la hora de tratar cualquier acero mediante procesos de metalurgia secundaria, es conocer la composición inicial y compararla con la composición final deseada, a fin de determinar que parámetros deben ser modificados para conseguir tal composición. Una vez realizada la comparación y determinados los componentes a modificar, se deben analizar cuáles son los aditivos más óptimos a añadir y en qué cantidad.

El simulador permite realizar varias simulaciones variando los aditivos, así como sus cantidades para ver cómo afecta a la composición final del acero, con el objetivo final de conseguir un acero con la composición deseada.

Las adiciones pueden afectar al contenido de otros elementos en el acero ya que en su composición cuentan con diferentes elementos, por lo que es algo que debemos tener presente, en el simulador lo podemos comprobar. Las adiciones deben ser realizadas en los momentos adecuados y en los sistemas oportunos, estos dos aspectos son muy importantes y se deben elegir de forma previa al tratamiento. El simulador permite comprobar si las elecciones previas en base a la teoría o experiencia son las correctas en cada caso particular. La temperatura final del acero y la comparativa entre la composición inicial y la deseada, entre otros aspectos, también nos servirá para tomar la decisión, y elegir los procesos de tratamiento más adecuados para cada grado de acero como se explica en el trabajo. Los aditivos y los procesos de tratamiento tienen diferentes costes, el



simulador es una herramienta muy útil para probar diferentes tratamientos a fin de conseguir el grado de acero requerido con el menor coste en cada simulación.

En base a la teoría, se puede saber más o menos los aditivos y cantidades que se deben adicionar, al igual que los mejores tipos de tratamiento a llevar a cabo, pero el simulador permite ponerlo en práctica y ensayar con diferentes procesos de metalurgia secundaria y valorar cuál es el más eficaz, tanto a nivel de composición y propiedades del acero, como de coste final. Aunque los simuladores puedan tener ciertas deficiencias, como no tener en cuenta ciertos parámetros importante a la hora de realizar los procesos de metalurgia secundaria en la realidad, son muy útiles para probar nuevos procesos y estrategias productivas de forma general, a fin de investigar y descubrir nuevas estrategias de fabricación del acero deseado con un menor coste y tiempo, en definitiva para intentar optimizar el proceso productivo en cualquier acería.

Como se ha visto en las simulaciones realizadas en el trabajo, el simulador permite probar diferentes configuraciones para observar las variaciones en el coste y la composición final. Por ejemplo, en el caso del acero de ultra bajo carbono con TiNb, mediante una tercera simulación se consiguió reducir el coste del acero líquido casi 3\$ por tonelada, y aunque esta diferencia parezca mínima, para una siderurgia con una producción anual de millones de toneladas de acero líquido, el ahorro alcanzado será de millones de dólares, algo que puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso.

Bajo mi punto de vista, los simuladores o programas de simulación de este tipo son muy beneficiosos tanto a nivel académico como profesional, permiten realizar una reproducción aproximada del proceso de metalurgia secundaria que puede ayudar en la toma de decisiones y reducir costes asociados al tratamiento del acero. En mi opinión creo que sería muy provechoso desarrollar nuevos programas o simuladores que reproduzcan fielmente los procesos de metalurgia secundaria, y de forma más global, el proceso íntegro de fabricación del acero



para que los profesionales del sector tengan una herramienta más para optimizar todo el proceso siderúrgico.

9. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acería: proceso exclusivo de producción y elaboración de acero a partir de arrabio o hierro fundido.

Aleantes: elementos adicionados al acero para alterar su composición con el objetivo de modificar sus propiedades para una aplicación específica.

Arrabio: es el producto de alto contenido en carbono obtenido en los altos hornos mediante la reducción del mineral de hierro.

Colada: es el proceso industrial basado en la solidificación del acero líquido en bloques o moldes con una determinada forma.

Conformabilidad: facilidad relativa con la que pueden conformarse determinadas aleaciones mediante operaciones como el afinado o el forjado.

Difusividad: es la propiedad de una mezcla o compuesto, en la cual la difusividad de una sustancia A es la capacidad de dicha sustancia de dispersarse o difundirse en otra sustancia B.

Escorificante: es un componente que se usa para ser adicionado en procesos de metalurgia secundaria, su finalidad es la de conseguir eliminar impurezas que afectan negativamente a la calidad del acero líquido

Forja: es el proceso de fabricación de objetos conformados, en frío o en caliente, mediante deformación plástica del material debido a la acción de fuerzas de compresión.



Fluidización: es el proceso basado en la suspensión de partículas sólidas en una corriente de fluido ascendente, ese fluido puede ser una gas, un líquido o una mezcla.

Laminación: proceso industrial que se basa en la reducción del espesor y modificación de las formas de los perfiles de hacer colados en lingoteras o máquinas de colada continua.

Pirometría: Medición de altas temperaturas.

Siderurgia: proceso completo de producción de acero a partir de mineral de hierro, engloba la acería y también la colada y laminación.

Slab de refrigeración: losa de refrigeración, es una losa cuya temperatura es considerablemente inferior a la del baño de acero y permite enfriarlo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABB, 'A stirring history', https://library.e.abb.com/public/b5f45245ff434d38be6f1a1d963fda23/45-48%203m6050_ES_72dpi.pdf (Acceso: 15/5/2017)
- [2] Ahindra Ghosh (2001), 'SECONDARY STEELMAKING. Principles and applications', CRC Press LLC
- [3] AISE (1998), "The Making, Shaping and Treating of Steel". Steelmaking and Refining Volume.
- [4] Apráiz Barreiro, J. (1978), 'Fabricación de Hierros, Aceros y Fundiciones', Urmo, S.A. de Ediciones
- [5] ARCELOR MITTAL (2007), 'El Proceso Siderúrgico', Equipo Técnico del Centro de Formación ARCELOR MITTAL Asturias (La Toba). Grafinsa, Oviedo
- [6] ASEA Metallurgy (1983), 'Future Technology for Melting, Refining and Casting', Technical Symposium
- [7] Astigarraga, J.L. (1995), 'Hornos de Arco para Fusión de Acero', McGraw-Hill Interamericana de España
- [8] BCS, Incorporated (2004), 'Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry', Columbia, November 2004
- [9] Bodsworth C. and Bell H.B. (1972), 'Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture', Longman Group Limited
- [10] Deo, B. et Boom, R. (1993), 'Fundamentals of Steelmaking Metallurgy', Prentice Hall Internacional (UK) Limited
- [11] Econommic Comission for Europe (1962), 'Comparison of Steel Making Processes', United Nations, Nueva York
- [12] Feinman J. et al (1987), 'Plasma Technology in Metallurgical Processing', Iron and Steel Society, Inc. Warrendle, Pensilvania, EE UU
- [13] Fruehan, R.J. (1985), 'Ladle Metallurgy Principles and Practices', Iron and Steel Society BookCrafters Inc.
- [14] Gaskell, D. (1973), 'Introduction to Metallurgical Thermodynamics', McGraw-Hill Kokakusha Ltd.
- [15] H. Gibbons, John (1980), 'Technology and Steel Industry Competitiveness', <http://ota.fas.org/reports/8019.pdf> (Acceso: 2/5/2017)
- [16] Ibarra Santamaría, J.M., 'Desgasificación a vacío', <http://boletines.secv.es/upload/198019113.pdf> (Acceso: 12/5/2017)
- [17] Palacios Repáraz, J.M. et al., 'La Fabricación del Acero', UNESID



- [18] Payno Herrera, Maria Luisa et Setién Marquínez, Jesús. 'Metalurgia y Siderurgia', Universidad de Cantabria, <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/metalurgia-y-siderurgia/materiales/Bloque%204%20Siderurgia.pdf> (Acceso: 25/4/2017)
- [19] Plataforma tecnológica española del acero, 'Modulo 09. Riesgos y medidas preventivas en el proceso de metalurgia secundaria', PREMASID (Plan de Integración en Prevención de Mandos intermedios en la Siderurgia)
- [20] Sheetharaman Seshadri (2014), 'Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial processes, Part A', ELSEVIER
- [21] Steeluniversity, 'Secondary Steelmaking Simulation, versio 2 Usr Guide'.
- [22] Tremps Guerra, Enrique et Enríquez Berciano, Jose Luis (2007). 'Monografías sobre la tecnología del acero. Parte II, Metalurgia Secundaria'. Universidad Politécnica de Madrid, http://oa.upm.es/1000/1/Berciano_Tremps_01.pdf (Acceso: 28/4/2017)
- [23] Turkdogan (1996), 'Fundamentals of Steelmaking', The Institute of Materials. <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/Fundamentals-of-Steel-Making-.pdf> (Acceso: 20/5/2017)
- [24] Walker, R.D. et al (1983), 'Small-Scale Steelmaking', Applied Science Publishers Ltd.