

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

EFECTO DE LAS DIFERENTES VARIABLES DE PROCESO  
DE LA DESGASIFICACION DE ALEACIONES DE ALUMINIO  
POR EL MÉTODO DE ROTOR-INYECTOR

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

SALVADOR FONSECA RODRÍGUEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Dr. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA
VOCAL	Dr. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA
SECRETARIO	Dr. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGAEZ
1ER SUPLENTE	Dr. HÉCTOR CRUZ MEJIA
2DO SUPLENTE	IQM. AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA.  
FACULTAD DE QUIMICA, EDIFICIO "D", CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA: \_\_\_\_\_

Dr. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGAEZ

SUPERVISOR TECNICO: \_\_\_\_\_

Dr. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA

SUSTENTANTE: \_\_\_\_\_

SALVADOR FONSECA RODRÍGUEZ

## **DEDICATORIAS**

### **A DIOS:**

Señor, tu que eres mi guía y compañía en el duro camino de la vida; dame la fuerza para ser digno de ti y de mi familia. Gracias por la vida, por mi mundo tal y como es y, por estar en mí.

### **A MI PADRE:**

#### **Arturo Fonseca Colín**

Por estar a mi lado siempre, por enseñarme a ser firme y fuerte ante las dificultades. Por enseñarme que hacer lo correcto no es una opción, sino la única forma de vivir. Deseando que cuando llegue el momento de estar frente al espejo de mi vida, sea tu reflejo lo que vea.

### **A MI MADRE:**

#### **Yolanda Rodríguez Hernández**

Para ti, enorme respeto y admiración por la dura tarea que desempeñas, por procurar el bienestar de la familia ante todo y enseñarme que el ayudar enriquece a las personas. Por los regañíos ante acciones equivocadas. Por tantas horas destinadas a cuidarnos y educarnos. Por ser mi madre, la mejor.

### **A MIS HERMANAS:**

#### **Liliana y Vanessa**

Gracias Dios por el par de mujeres triunfadoras que como hermanas me diste. Porque la unidad entre nosotros es nuestra mayor fuerza. Por alcanzar el éxito bajo los principios de esfuerzo y dedicación. Por ese porte de madurez a pesar de los pocos años andados.

### **A MIS ABUELOS:**

#### **José Raquel Rodríguez Morquecho † María de Jesús Hernández Carrillo †**

Todo es tan diferente ahora que no están, difícil es comprender y acostumbrarse a su ausencia, pero tengo que continuar con la firme convicción de que todo va a estar bien. Para ustedes que siempre creyeron en mí.

### **A CACHO:**

#### **Claudia Mónica Padilla Carrillo**

Por ser mí fe, mi voluntad, mi consuelo, mi camino, la fuerza que alimenta cada uno de mis pasos y mi compañera incondicional en duros momentos.

### **A MIS TIOS:**

#### **Salustia y Zeferino Rodríguez Hernández**

La palabra gratitud tiene un significado profundo y vital. De la gratitud nace la vida y la vida es amor por los momentos compartidos con seres queridos. Gracias, por ser más que mis tíos.

# CONTENIDO

<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>4</b>
1.1 HISTORIA DEL ALUMINIO	4
1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO	5
1.3 IMPORTANCIA COMERCIAL DEL ALUMINIO	6
1.4 APLICACIONES DEL ALUMINIO	10
1.4.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ	11
1.4.2 INDUSTRIA AEROESPACIAL	14
1.5 PROBLEMAS DEL ALUMINIO FUNDIDO	15
1.5.1 OXIDACIÓN DEL ALUMINIO	15
1.5.2 ABSORCIÓN DE HIDRÓGENO	16
1.5.2.1 POROSIDADES	19
1.5.2.2 EFECTO DE LA POROSIDAD SOBRE LAS PROPIEDADES	21
1.6 MÉTODOS DE REMOCIÓN DE HIDRÓGENO	23
1.6.1 MÉTODOS DE DESGASIFICADO	25
1.6.1.1 DESGASIFICADO NATURAL	25
1.6.1.2 DESGASIFICADO AL VACÍO	25
1.6.1.3 DESGASIFICADO POR PURGADO DE GAS	26
1.6.2 TRATAMIENTO CON GAS REACTIVO O INERTE	28
1.6.3 FORMAS DE INTRODUCIR EL GAS DE PURGADO	29
1.6.3.1 TABLETAS	29
1.6.3.2 LANZAS DE GRAFITO	30
1.6.3.3 LANZAS CON TAPÓN POROSO	30
1.6.3.4 PROPELA ROTATORIA	30
1.7 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS	34
1.8 OBJETIVOS	34
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>36</b>

<b>3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>44</b>
<b>3.1 ASPECTOS TERMODINÁMICOS</b>	<b>44</b>
<b>3.2 FACTORES CINÉTICOS</b>	<b>46</b>
<b>3.2.1 BALANCE DE MASA PARA LA REMOCIÓN DE HIDRÓGENO (EN LA SUPERFICIE DE LA BURBUJA DE GAS DE REMOCIÓN)</b>	<b>47</b>
<b>3.2.2 BALANCE DE MASA PARA EL HIDRÓGENO EN LA ENTRADA DEL REACTOR BATCH</b>	<b>49</b>
<b>4. MÉTODO DE SOLUCIÓN</b>	<b>56</b>
<b>4.1 ANÁLISIS DEL PROCESO</b>	<b>56</b>
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>59</b>
<b>5.1 CORRELACIÓN Cks1</b>	<b>68</b>
<b>5.1.1 CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO</b>	<b>68</b>
<b>5.1.2 PRESIÓN PARCIAL DE HIDRÓGENO A LA SALIDA</b>	<b>68</b>
<b>5.1.3 CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO</b>	<b>69</b>
<b>5.1.4 EFICIENCIA DE DESGASIFICACIÓN</b>	<b>69</b>
<b>5.2 CORRELACIÓN Cks2</b>	<b>70</b>
<b>5.3 COMPARACIÓN ENTRE LA CORRELACIÓN CSK1 Y LA CORRELACIÓN CSK2</b>	<b>70</b>
<b>5.3.1 CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO</b>	<b>70</b>
<b>5.3.2 PRESIÓN PARCIAL DE HIDRÓGENO A LA SALIDA</b>	<b>71</b>
<b>5.3.3 CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO</b>	<b>71</b>
<b>5.3.4 EFICIENCIA DE DESGASIFICACIÓN</b>	<b>72</b>
<b>6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>73</b>
<b>6.1. EFECTO DE LA MASA DE ALUMINIO</b>	<b>73</b>
<b>6.2. EFECTO DEL TAMAÑO DE BURBUJA</b>	<b>73</b>
<b>6.3. EFECTO DEL FLUJO DE GAS INYECTADO</b>	<b>73</b>

<b>6.4. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL DE HIDRÓGENO DEL BAÑO</b>	<b>74</b>
<b>6.5. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE INMERSIÓN</b>	<b>74</b>
<b>6.6. EFECTO DE LA TEMPERATURA</b>	<b>74</b>
<b>6.7. CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO</b>	<b>74</b>
<b>6.8. SENSIBILIDAD DEL MODELO A LAS CORRELACIONES <math>C_{ks1}</math> y <math>C_{ks2}</math></b>	<b>75</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>76</b>
<b>9. APENDICES</b>	
<b>9.1 APENDICE A</b>	<b>77</b>
» CORRELACIONES DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.	<b>77</b>
» CORRELACIONES DE VELOCIDAD DE ASCENSO DE LA BURBUJA EN EL BAÑO.	<b>77</b>
» CORRELACIÓN DE ENERGÍA LIBRE DE GIBBS PARA LA REACCIÓN DE DISOLUCIÓN DE HIDRÓGENO.	<b>78</b>
» COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE HIDRÓGENO EN ALUMINIO.	<b>79</b>
» ÁREA TOTAL DE LA SUPERFICIE DE LAS BURBUJAS.	<b>79</b>
» FLUJO MÁSSICO DEL GAS DE REMOCIÓN INYECTADO.	<b>79</b>
<b>9.2 APENDICE B</b>	<b>80</b>
» PROGRAMA DE CÓMPUTO.	
<b>9.3 APENDICE C</b>	<b>83</b>
» LISTA DE SÍMBOLOS (MODELO MATEMÁTICO).	

# 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1 HISTORIA DEL ALUMINIO

El aluminio es un metal mucho menos utilizado que el hierro o el cobre a lo largo de la historia de la humanidad. La metalurgia del aluminio es más complicada, ya que hay que separar el metal de los elementos químicos con los que aparece combinado en la naturaleza. El aluminio es un metal fuertemente electronegativo y posee una fuerte afinidad por el oxígeno; esto es evidente por la facilidad con la que se óxida. Por esta razón, aunque se encuentra entre los seis metales distribuidos más extensamente en la superficie de la tierra, no fue aislado hasta ya avanzado gran parte del siglo diecinueve.

La alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) era ya conocida en el siglo dieciocho. Sin embargo, los primeros intentos para aislar el metal fueron hechos por Sir Humphrey Dhabí. En 1809, Humphrey fundió hierro en presencia de alúmina, obteniendo una aleación de hierro y de un nuevo metal que bautizó como Aluminum.

La bauxita, mineral de aluminio fue encontrado en 1821, en la región de Les Baux, en el sur de Francia. En esa época, el metal de aluminio todavía no existía para el mundo civilizado. Eso solamente ocurrió a partir de 1825, cuando H. C. Oersted, tuvo éxito en la obtención de polvo de aluminio por medio de la reducción del cloruro de aluminio anhidro con una amalgama de sodio; dos años después, F. Wohler substituyó la amalgama por potasio; y entre 1827-1847 descubrió y enumeró muchas de las propiedades químicas y físicas del aluminio. Sin embargo, muchos años pasaron antes que el metal se pudiera producir comercialmente.

El científico francés, Henri Sainte-Claire Deville, en 1850 mejoró el método de preparación de Wohler, utilizando en su proceso químico cloruro de aluminio y sodio fundido. De esta manera haciendo la producción de aluminio un asunto comercial: el precio del metal, sin embargo, seguía siendo comparable con el del oro. La producción del aluminio recibió un fuerte ímpetu cuando Roberto Bunsen y Deville, demostraron como el metal se podía obtener electrolíticamente de sus minerales. Con la invención del dínamo, una fuente más barata de electricidad, en 1886, el proceso de Deville fue substituido con éxito por el proceso electrolítico para la producción de aluminio a partir de alúmina y criolita fundida ( $\text{AlF}_3\text{NaF}$ ); en Francia por Paul Louis Toussaint Heroult y en los Estados Unidos por Charles Martin Hall.

La producción moderna de aluminio comienza con la bauxita mineral, que contiene aproximadamente 25% de aluminio. Esta es convertida en alúmina por digestión con una solución de hidróxido de sodio bajo presión (Proceso Bayer), y la alúmina purificada producida es añadida a una mezcla fundida de criolita y feldespato. Esta mezcla es electrolizada en una celda con ánodos de carbón, y la mezcla fundida se pega ligeramente en el fondo de la celda.

En 1885, los hermanos Cowle produjeron las primeras aleaciones de aluminio que contenían hierro y cobre. En 1906 se produjo por primera vez duraluminio, una aleación más densa que el aluminio, pero mucho más resistente. Durante el último siglo se han conseguido numerosas aleaciones muy utilizadas, sobre todo, en aplicaciones de transportación y en nuevas tecnologías. Su utilización ha sufrido un avance espectacular en el siglo XX debido a su empleo en la industria automotriz y aeronáutica. Hoy en día el aluminio forma parte de la vida cotidiana de toda persona y se caracteriza como uno de los materiales más importantes del siglo XX.

## 1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO

La mayor parte de los elementos metálicos pueden alear al aluminio, pero sólo unos cuantos tienen importancia comercial. Los principales constituyentes de aleación añadidos al aluminio son: cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc. Hay otros que sirven como aditivos suplementarios, para mejorar las propiedades y características metalúrgicas. Todos estos elementos son usados para incrementar la resistencia del aluminio puro.

Dos clases de aleaciones son consideradas. La primera son las “aleaciones de fundición”, las cuales son directamente fundidas en sus formas deseadas por uno de estos tres métodos: colada en arena, colada continua, molde permanente por gravedad; entre tanto la segunda clase, “aleaciones de conformado”, son fundidas en barras o billetes que pueden ser trabajadas mecánicamente en frío o caliente, en operaciones de extrusión, forja, laminado, perforado y estirado.

Las principales clases de aleaciones para conformado metal-mecánico son: la serie 2000 (aleaciones Al-Cu), las cuales son de colado difícil en comparación con las aleaciones que contienen grandes cantidades de silicio, tienen propiedades muy buenas de tensión, y se usan en partes aerospaciales de gran calidad. La serie 3000, aleaciones Al-Mn, son usadas principalmente para la fabricación de latas para alimentos. La serie 5000, aleaciones Al-Mg, las cuales tienen excelente resistencia a la corrosión, presentan facilidad al maquinado y apariencia atractiva cuando se anodizan, y son usadas para aplicaciones estructurales y arquitectónicas sin protección. La serie 6000, aleaciones Al-Mg-Si, las cuales son las aleaciones más comunes para extrusión y son usadas particularmente en la industria de la construcción; y la serie 7000, aleaciones Al-Zn-Mg, tienen buenas características de maquinado y se estabilizan a temperatura ambiente, alcanzando resistencias moderadamente altas en un tiempo relativamente corto, sin tratamiento térmico de solución, se usan en aviones y vehículos militares.

El uso de una aleación para una aplicación en particular depende de factores como: las propiedades físicas y mecánicas requeridas, costo del material y condiciones involucradas en el servicio. El gran beneficio del aluminio es que están disponibles una extensa variedad de aleaciones, con diferentes propiedades mecánicas y de protección y, junto con la excelente calidad de terminados que pueden dárseles, hace del aluminio un material muy versátil.

### 1.3 IMPORTANCIA COMERCIAL DEL ALUMINIO

Es impresionante como el aluminio en poco más de un siglo ha pasado de ser una novedad, a ocupar en términos de producción de metales y aleaciones el segundo lugar mundial, solo atrás de los hierros. Las propiedades del aluminio son las causantes de su amplio uso, entre ellas destacan su baja densidad, buena conductividad térmica y eléctrica, bajo punto de fusión, buena maquinabilidad, excelente acabado superficial y alta resistencia a la corrosión.

Hoy en día, existe un amplio campo de estudio y desarrollo de aleaciones base aluminio, dirigidas a satisfacer innumerables usos en la vida actual. Desde algún artefacto decorativo carente de todo control en sus propiedades mecánicas, hasta su extenso uso en la industria automotriz y las más complejas aplicaciones en aeronáutica, exploración espacial y electrónica.

Los últimos años han sido difíciles para la industria de la fundición y para la manufactura en general. Si bien ninguna porción de la industria de la fundición se encuentra en una buena situación, los fundidores de aluminio la han pasado mejor que muchas de sus contrapartes ferrosas. Mundialmente las fundiciones de aluminio en su mayor parte vieron que sus producciones permanecieron constantes en 2002, comparados con las de 2001. El mercado de la fundición de aluminio sólo vio disminuir sus producciones un 33% en 2002, lo que fue bastante más benéfico que las fundiciones de hierro gris y de acero, que vieron una disminución de al menos 50% en sus producciones <sup>(1)</sup>.

En Estados Unidos los fundidores de aluminio fueron el único grupo para quienes el cambio porcentual neto durante el 2002 fue positivo, aunque solo fue del 1%. También, el aluminio califica bien en cuanto utilización de capacidad, que es de 69.8% en 2002, sólo inferior a las fundidoras de bronce y latón. Una de las razones por la cual la fundición mundial de aluminio se encuentra en mejor posición que otros segmentos del mercado, es que en general las fundiciones de aluminio no se ven tan afectadas por la competencia como en otros segmentos.

La economía mas fuerte mundialmente es la estadounidense y esta es una referencia de lo que ocurre en el mercado mundial del aluminio. Un estudio realizado indica que la producción de la industria de la fundición de aluminio en Estados Unidos creció 7.1% en 2004 a 2,409,000 toneladas, y continuará con este crecimiento a una tasa anual promedio del 2%, hasta alcanzar los 2.7 millones de toneladas en 2013. Un año pico de 2.8 millones de toneladas se espera sea el 2008. Además, se estima que las ventas alcancen los 10.7 billones de dólares y una utilización de capacidad del 83% en 2004 <sup>(2)</sup>. En la Tabla 1.1 <sup>(2)</sup> se aprecia la capacidad de producción de la industria de la fundición en Estados Unidos, así como su tasa de utilización en 2004.

Tabla 1.1 Tasas de utilización y capacidad de producción de industria de la fundición estadounidense durante 2004 <sup>(2)</sup> .		
Metal	Capacidad (ton)	(%) Utilización
Hierro	11,930,000	81
Acero	1,150,000	83
Aluminio	2,915,000	83
Base-Cobre	400,000	80
Magnesio	140,000	94
Zinc / Plomo	410,000	84
Otros No-Ferrosos	70,000	74

La Figura 1.1 <sup>(2)</sup> muestra la tendencia en producción de diversos metales en la industria de la fundición estadounidense de 2001 a 2004. Asimismo, se presenta un estimado de la producción alcanzada para 2005.

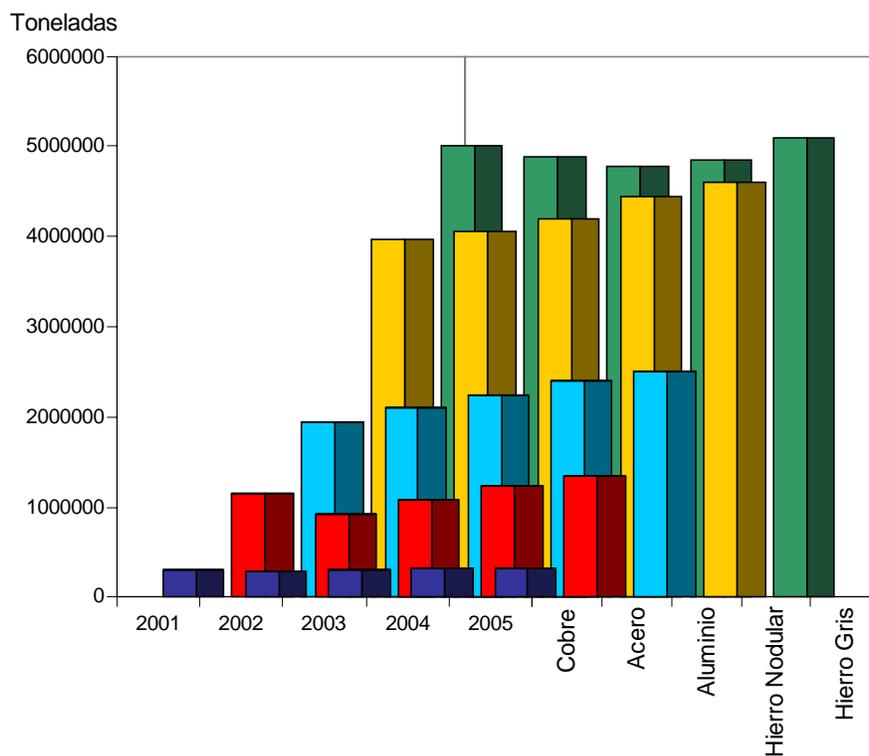


Figura 1.1 Producción en la industria de la fundición estadounidense <sup>(2)</sup>.

En la Tabla 1.2 <sup>(2)</sup> se presentan los incrementos y decrementos en la demanda de piezas coladas de aluminio en sectores específicos del mercado en Estados Unidos.

Tabla 1.2 Tasas de crecimiento y disminución en el uso de piezas de aluminio en sectores específicos del mercado estadounidense <sup>(2)</sup> .		
Industria	Tasa de crecimiento promedio anual	Factores
Motores de Combustión Interna	+2.4%	- Mayor demanda en podadoras y automóviles deportivos
Herramientas	+1.2%	- Reemplazo de Magnesio y Plástico
Computadoras/Oficina	-1.9%	- Aumento de Piezas Plásticas
Refrigeración/A.C	+2.6%	- Reemplazo de Plásticos
Medidores y Reguladores	+1.1%	- Reemplazo de Plásticos
Utensilios de Hogar	+1.0%	- Reemplazo del hierro gris - Perfiles para ventanas
Motores de Vehículos	+2.1%	- Conversión de diversas partes del vehículo al aluminio.
Aviones y partes	+2.3%	- Reemplazo del Titanio
Instrumentos	+2.3%	- Mayor demanda del sector industrial
Marina y otros	+3.2%	- Crecimiento del mercado

\* Tasa de crecimiento promedio anual para el intervalo 2003-2013.

De manera similar, la tendencia en todo el mundo de usar cada vez más productos de aluminio o aleaciones de este, va en aumento. En la Tabla 1.3 <sup>(3)</sup> se muestra la producción mundial durante 2003 por nación. Se aprecia que Japón, China, Italia, Alemania, Rusia y México son grandes productores de piezas coladas de aluminio.

Tabla 1.3 Toneladas producidas de aluminio a nivel mundial durante 2003 <sup>(3)</sup> .					
País	Toneladas	País	Toneladas	País	Toneladas
Alemania	660,548	España	265,800	Portugal	17,450
Austria	102,912	Hungría	63,401	Rumania	18,100
Bélgica	25,050	India	242,000	Rusia	600,000
Brasil	122,048	Irán	30,000	Sudáfrica	45,600
China	979,290	Italia	777,000	Suecia	37,100
Croacia	9,907	Japón	1,217,129	Suiza	17,083
Rep Checa	55,839	Corea	45,500	Taiwán	267,000
Francia	390,241	México	480,000	Tailandia	3,200
Finlandia	5,287	Noruega	23,278	Turquía	41,350
Eslovenia	21,882	Polonia	97,922	Ucrania	20,500

México no podía ser la excepción y la tendencia a una mayor producción de piezas de aluminio colado muestra un continuo y constante crecimiento. A continuación la Figura 1.2 <sup>(4)</sup> muestra los 5 principales metales producidos en el país desde 1992 hasta el 2000; donde se observa como el hierro gris sigue siendo el líder en producción, pero llama la atención una tendencia más acelerada de crecimiento de la producción de piezas coladas de aluminio.

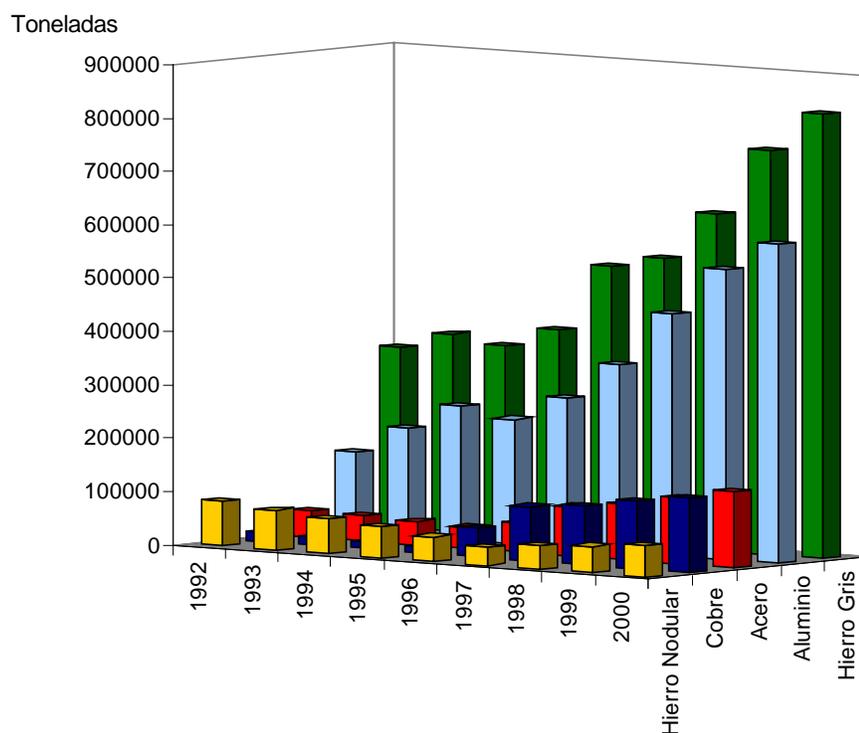
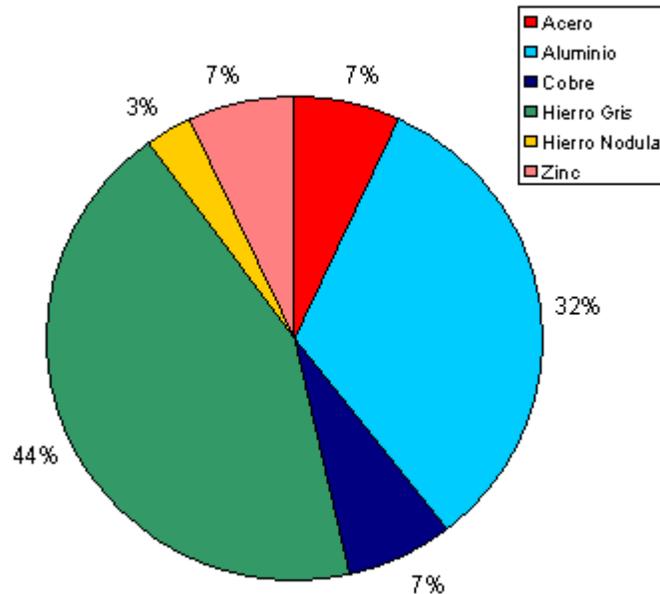


Figura 1.2 Producción de la industria de la fundición en México <sup>(4)</sup>.

En la Tabla 1.4 <sup>(4)</sup> se presenta la misma información mostrada en la Figura 1.2 pero en forma tabular y con cifras.

Tabla 1.4 Valores de producción de industria de la fundición en México <sup>(4)</sup> .					
Año	Producción (toneladas)				
	Acero	Aluminio	Hierro Gris	Hierro Nodular	Cobre
1992	49,690	151,400	339,365	83,760	17,105
1993	46,732	201,690	370,682	75,052	13,920
1994	44,261	251,980	355,023	66,344	12,975
1995	39,680	233,600	392,530	57,340	10,830
1996	54,536	280,320	518,656	46,470	53,028
1997	92,734	350,792	540,613	33,476	101,445
1998	103,582	453,652	630,540	43,580	110,458
1999	124,300	544,382	756,648	50,117	127,026
2000	142,943	598,820	832,313	58,635	138,780

En la Figura 1.3 <sup>(4)</sup> se presenta un gráfico que indica el porcentaje de la producción de piezas coladas por metal. Nuevamente se ve que en segundo lugar se encuentran las piezas base Aluminio con un 32%, siendo el primer lugar los hierros con un 44% del total.



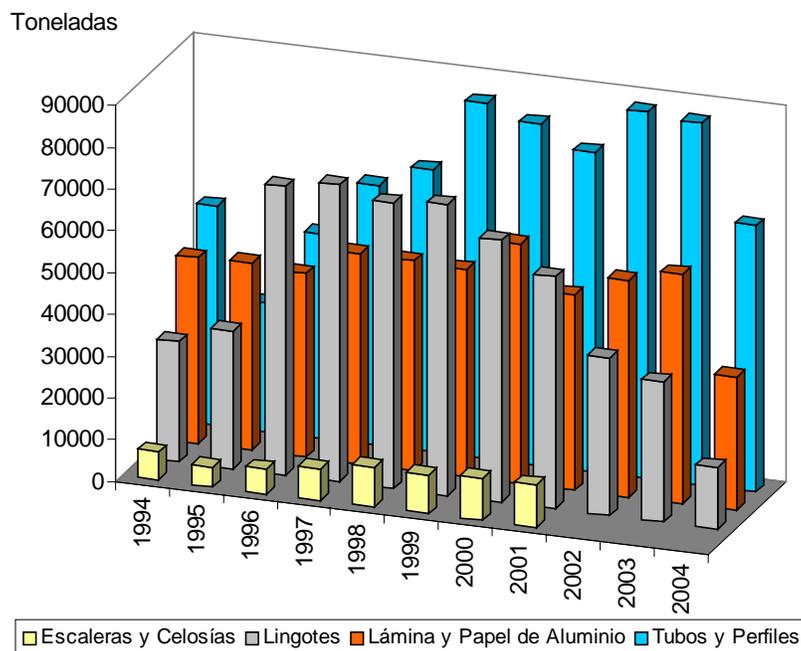
**Figura 1.3 Porcentajes de la producción total por metal o aleación en México <sup>(4)</sup>.**

#### 1.4 APLICACIONES DEL ALUMINIO.

La aplicación del aluminio en la industria de la construcción representa el mercado más grande para la industria del aluminio. Millares de casas emplean el aluminio en puertas, cerraduras, ventanas, pantallas, boquillas y canales de desagüe. El aluminio es también uno de los productos más importantes en la construcción industrial. El transporte constituye el segundo gran mercado. Muchos aviones comerciales y militares están hechos casi en su totalidad de aluminio. En los automóviles, el aluminio aparece en interiores y exteriores como molduras, parrillas, rines, aire acondicionado, transmisiones automáticas, algunos radiadores, bloques de motor, paneles de carrocería, etc.

Se encuentra también en carrocerías, vagones, contenedores de carga, señales de carretera, división de carriles y alumbrado. En la industria aeroespacial, el aluminio también se encuentra en motores de aviones, estructuras, cubiertas y trenes de aterrizaje e interiores; a menudo cerca de 80% del peso del avión es de aluminio. La industria de empaques para alimentos es un mercado en rápido crecimiento para el aluminio.

En aplicaciones eléctricas, los alambres y cables de aluminio son los principales productos. El aluminio se encuentra en el hogar en forma de utensilios de cocina, papel de aluminio, herramientas, aparatos portátiles, aire acondicionado, congeladores, refrigeradores, y en equipo deportivo como esquíes y raquetas de tenis. Existen cientos de aplicaciones químicas del aluminio y sus compuestos. El aluminio en polvo se usa en pinturas, combustible para cohetes, explosivos y como reductor químico. En la Figura 1.4 <sup>(5)</sup> se muestra la producción de aluminio por tipo de producto en la última década en México.



**Figura 1.4 Principales productos elaborados por la industria de la fundición de aluminio en México <sup>(5)</sup>.**

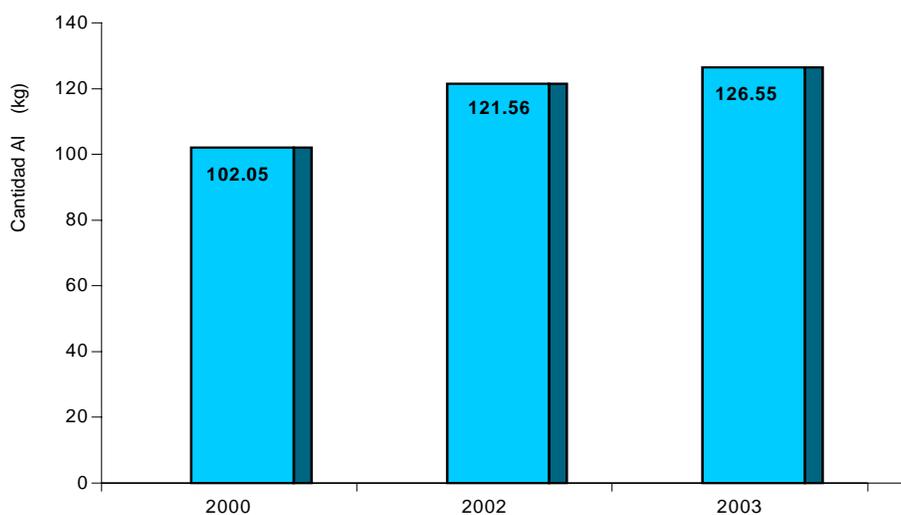
### 1.4.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Una de las principales razones por la cual los fundidores de aluminio confían en el futuro, es el constante aumento en el uso de piezas coladas de aluminio. La tendencia hacia componentes de aluminio ligeros continúa creciendo cada día. En la vanguardia de esta tendencia está la industria del automóvil. ¿Por qué la industria automotriz se está convirtiendo al aluminio? Hay tres razones principales para ello: a) Aspectos ambientales, b) Seguridad, c) Mejor comportamiento mecánico de los vehículos.

Debido a los cada vez más restrictos controles en el consumo de combustible, los fabricantes buscan diseños con materiales más ligeros, alcanzando reducciones de peso en diversos sistemas de un vehículo (motor, tren de propulsión, suspensión, etc). En Estados Unidos las tres principales constructoras de autos (General Motors, Ford y Daimler Chrysler) han alcanzado niveles de eficiencia a este respecto de 34 km/l para

vehículos medianos, mediante el diseño y uso de piezas coladas en aluminio. Se puede ganar de 6 a 8% en ahorro de combustible por cada reducción de 10% en el peso del vehículo, al sustituir al acero por aluminio. Además, casi el 90% del aluminio en un auto puede recuperarse y reciclarse.

Se espera que las piezas coladas de aluminio para automóviles aumenten de 1.07 millones de toneladas en 2001 a 1.65 millones de toneladas en 2011, un aumento de 4.4% por año. Esto traduce a un aumento de 114 kg de aluminio por auto en 2001 a 185 kg por automóvil antes de 2011<sup>(1)</sup>. La Figura 1.5 <sup>(1)</sup> ilustra el crecimiento del peso neto de aluminio usado en la manufactura de automóviles.



**Figura 1.5 Contenido promedio de aluminio en vehículos ligeros manufacturados en Estados Unidos <sup>(1)</sup>.**

Las Tablas 1.5 y 1.6 <sup>(6)</sup> destacan el pronóstico para el uso de piezas coladas de aluminio en autos ligeros para el año 2006 (Tabla 1.5) y al año 2008 (Tabla 1.6).

<b>Tabla 1.5 Pronóstico de piezas fabricadas en aluminio para uso en automóviles <sup>(6)</sup>.</b>		
<b>Componente</b>	<b>2002</b>	<b>2006</b>
Bloque de Motor	40%	60%
Culata	90%	96%
Múltiple	40%	28%
Transmisión	95%	94%
Ruedas	63%	75%
Pistones	95%	94%
Frenos y Suspensión	15%	25%

<b>Tabla 1.6 Pronóstico del uso de piezas de aluminio en autos para 2008 <sup>(6)</sup>.</b>	
<b>Componente</b>	<b>% Aluminio colado usado antes de 2008</b>
Cubierta del brazo del eje de balancín	25
Brazo del eje de balancín	30
Distribuidor	60
Calibradores para freno de Disco	8
Rotores de los frenos de disco	8
Cubiertas de la bomba de agua y bomba de aceite	50
Nudillo de manejo	10
Brazos de control de la suspensión	10
Cubierta diferenciada del portador	10
Pedal del acelerador	10
Cuerpo del cilindro de freno de rueda	30

Si el diseño de un componente en hierro o acero fuera convertido directamente al aluminio, la pieza alcanzaría una pérdida de peso del 67%. Sin embargo, una sustitución directa no es posible debido a la menor resistencia del aluminio. El módulo de elasticidad para el acero, hierro dúctil, hierro gris y aluminio son  $30 \times 10^6$  lbf/in<sup>2</sup>,  $24 \times 10^6$  lbf/in<sup>2</sup>,  $13 \times 10^6$  lbf/in<sup>2</sup> y  $10 \times 10^6$  lbf/in<sup>2</sup> respectivamente. Para superar esta desventaja, la meta es optimizar el diseño y geometría de las piezas, y así reducir las cargas aplicadas en áreas críticas, llegando al punto donde el diseñador y los ingenieros establezcan las restricciones en el diseño y fabricación para asegurar que el diseño final del componente sea seguro. Las Figuras 1.6 a, b <sup>(6)</sup> muestran piezas coladas de aluminio empleadas en la industria automotriz, diseñadas para la sustitución de estos componentes fabricados convencionalmente en otros metales.



**Figura 1.6a Bloque de Motor**



**Figura 1.6b Pedal de Freno y Acelerador**

El aluminio absorbe hasta dos veces más energía en un choque. En un choque, los autos con partes de aluminio se diseñan para plegarse en forma predecible para que sea el vehículo, y no los pasajeros, el que absorba la mayor parte de la energía de colisión. El Audi A8 es un automóvil totalmente de aluminio, y se dice que es el sedán más seguro del mundo. En cuanto al mejor comportamiento mecánico de los vehículos se puede decir que en general, los vehículos fabricados con aluminio al ser más ligeros, aceleran con mayor rapidez y frenan lógicamente en una menor distancia que vehículos más pesados. Automóviles de máximo rendimiento, como el Ferrari Modena 360 usa aluminio para mejorar su eficiencia de manejo. Con tales ventajas tanto para los fabricantes como para los consumidores de automóviles, es de creerse los pronósticos de que los automóviles y camiones totalmente de aluminio serán comunes dentro de pocos años.

#### **1.4.2 INDUSTRIA AEROESPACIAL**

El mercado automotriz no es el único segmento que cosecha las ventajas de las piezas coladas de aluminio. Hoy en día la industria aeronáutica basa sus objetivos en la obtención de piezas con menor peso relativo, menores costos de fabricación y mayores rendimientos. Las necesidades de la industria aeronáutica, se traduce en mejoras continuas y éstas han contribuido en los grandes desarrollos tecnológicos en diferentes campos de las áreas de la ingeniería como por ejemplo: aerodinámica, diseño estructural y ciencias de los materiales.

Una alternativa para disminuir el peso en el diseño de aeronaves espaciales, satélites, sondas, lanzadores, transbordadores, estaciones espaciales, es la utilización de aleaciones aluminio-litio. Su baja densidad junto con su gran rigidez y en aleaciones específicas de alta resistencia, pueden proporcionar con muy pocos cambios en el diseño y fabricación, disminuciones del 7 al 20% en peso. Aleaciones específicas de Al-Li y Al-Mg-Li, muestran un marcado incremento de tenacidad a temperaturas criogénicas, propiedad importante en el uso de tanques para oxígeno e hidrógeno líquidos utilizados en cohetes de propulsión. Este tipo de aleaciones pueden proporcionar hasta un 12% adicional de resistencia a la tensión sobre aleaciones convencionales, tales como 2219 y 2014.

Asimismo, los procesos de fabricación para la obtención de piezas se han perfeccionado de manera notable. La empresa Lockheed Martin Tactical Aircraft Systems <sup>(7)</sup>, aplicará el colado de aluminio por modelo perdido para la elaboración de piezas para aviones. El proceso consiste en fundir aluminio y colarlo en un molde, para fabricar conjuntos grandes de una sola pieza, como las cabinas de los aviones caza F-16; con esto se elimina el corte, maquinado, taladrado y atornillado para formar un ensamble. El proceso convencional de armar esta cabina comprende taladrar y atornillar casi 150 detalles de diseño.

Este tipo de técnicas ahorran de 15 a 20% de costos totales, respecto a los procesos convencionales. Su construcción por este método permite obtener piezas terminadas en un solo paso, reduciendo los problemas potenciales de fatiga, asociados con los numerosos agujeros para tornillos y remaches necesarios para armar las partes de una sección. Además, con facilidad se pueden crear formas que son difíciles o imposibles de maquinar.

La industria manufacturera de bienes con componentes de piezas de aluminio fundido continúa esforzándose día con día para alcanzar la excelencia en sus productos, de tal manera que dichas piezas son requeridas bajo un control de calidad estricto tendiente a la excelencia, bajo estas condiciones de trabajo los fundidores se han visto en la necesidad de buscar, encontrar e implementar procesos que tengan como consecuencia la experiencia para obtener una producción de gran calidad.

Por tanto, es de gran importancia conocer y entender los principales problemas en el manejo de aluminio fundido, como lo son: su gran tendencia a la oxidación y la elevada solubilidad de hidrógeno en aluminio líquido. En la siguiente sección se explican las causas y naturaleza de estos problemas.

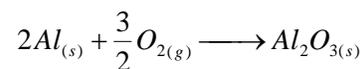
## 1.5 PROBLEMAS DEL ALUMINIO FUNDIDO

El manejo del aluminio en estado líquido es de importancia decisiva con vistas para la obtención de piezas fundidas con propiedades mecánicas específicas. Los dos principales problemas que presenta son:

- 1) Oxidación. El aluminio fundido tiene una alta afinidad por el oxígeno, formando rápidamente una película de óxido en la superficie del baño.
- 2) Absorción de hidrógeno. Debido a la elevada solubilidad de este gas en aluminio y sus aleaciones por arriba de sus temperaturas de fusión así como a su poca solubilidad en aluminio sólido, este gas provoca la presencia de poros en la pieza después de su solidificación.

### 1.5.1 OXIDACIÓN DEL ALUMINIO

El aluminio es un metal eminentemente oxidable, según la reacción:



El aluminio y sus aleaciones se recubren ya a temperatura ambiente con una delgada capa de óxido, pero a diferencia del aluminio en estado sólido donde esta capa alcanza un espesor finito, en estado líquido el aluminio forma una capa que se hace más gruesa con el aumento de la temperatura. Conforme transcurre la fusión aumenta más la formación de óxidos que ni son reducidos ni fundidos durante el proceso. Sobre la superficie del baño se forma la película de óxido de aluminio, sin embargo, como se mencionó anteriormente, contrariamente a lo que ocurre en estado sólido, la oxidación en estado líquido es continua, favorecida por la elevada difusión del oxígeno a alta temperatura a través de la capa ya formada; por esta razón es necesario evitar un tiempo de permanencia prolongado de la aleación a temperatura elevada.

El grado de oxidación durante el proceso de fusión depende de la composición de la aleación, de la temperatura, del tiempo de fusión, del tipo de horno y su calentamiento, tamaño de la superficie del baño y tipo de material utilizado. La oxidación durante el proceso de fusión genera una pérdida de metal en forma de residuos calcinados, incluyéndose en ella la pérdida por impurezas adheridas a los elementos de aleación, así como los residuos calcinados por volatilización. Durante el traspaso del metal en hornos de conservación y de fusión, así como al momento de verter el metal al molde, aumenta el contenido de óxidos en el baño debido a una mayor exposición del aluminio líquido con el aire.

Las partículas de alúmina formadas tienen una densidad superior a la del aluminio fundido y estas descienden hacia el fondo del baño líquido. Sin embargo, a causa de las tensiones superficiales y de la consistencia porosa de dichas partículas, estas se impregnan de aluminio líquido y entonces presentan una densidad aparente, análoga a la del aluminio fundido, lo cual ocasiona que estas partículas queden inmersas en el seno del baño.

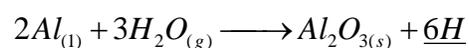
En las piezas fundidas la presencia de óxidos pueden ser como hilos aislados, películas o nódulos de óxido. Estas inclusiones disminuyen las propiedades mecánicas de las piezas fundidas, así como la resistencia a la corrosión, aumentando el desgaste de las herramientas en el mecanizado, especialmente cuando se ha producido una transformación en corindón. Las aleaciones de aluminio que contienen zinc, magnesio y sodio, son especialmente sensibles a la oxidación.

### 1.5.2 ABSORCIÓN DE HIDRÓGENO

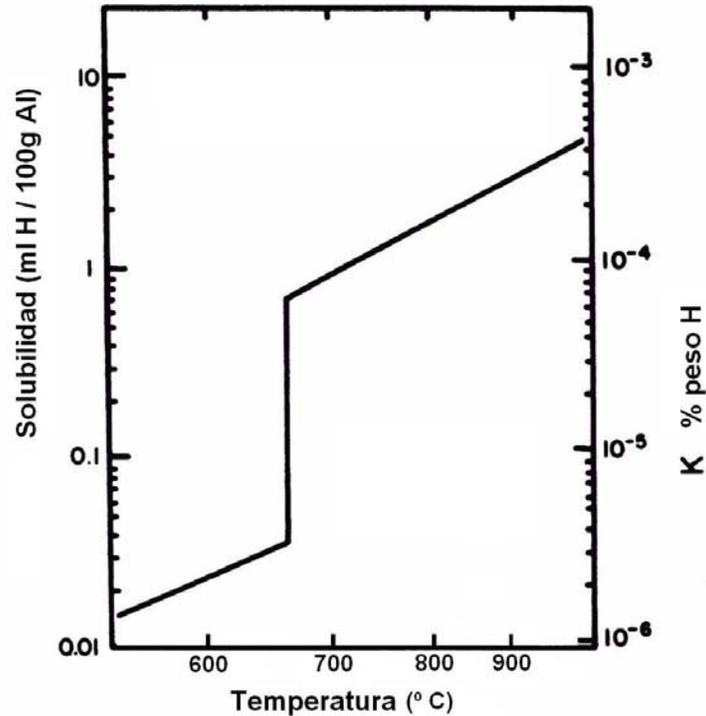
En todos los metales o aleaciones, los gases pueden ser retenidos mecánicamente (gases ocluidos) o químicamente (solución sólida). La solubilidad de los gases en metales fundidos aumenta con la temperatura, y la cantidad de gas absorbido aumenta proporcionalmente con el tiempo de permanencia.

Algunos gases son mucho más solubles que otros en las mismas condiciones de temperatura y presión; en el caso del aluminio y sus aleaciones, el hidrógeno es con mucho el gas más soluble. Otros gases solubles en el aluminio líquido son: metano, oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno. Debido a esta tendencia del hidrógeno a disolverse fácilmente en aluminio líquido, resulta común que todos los baños fundidos de aluminio contengan cierta concentración de hidrógeno disuelto. La cantidad de hidrógeno disuelto en el aluminio depende de la presión parcial de hidrógeno en la atmósfera, de la temperatura del baño y de la composición de la aleación.

El aluminio líquido tiene una elevada capacidad de disolver hidrógeno en forma atómica, el cual se desprende cuando reacciona el baño con la humedad presente en la atmósfera del horno, según la reacción:



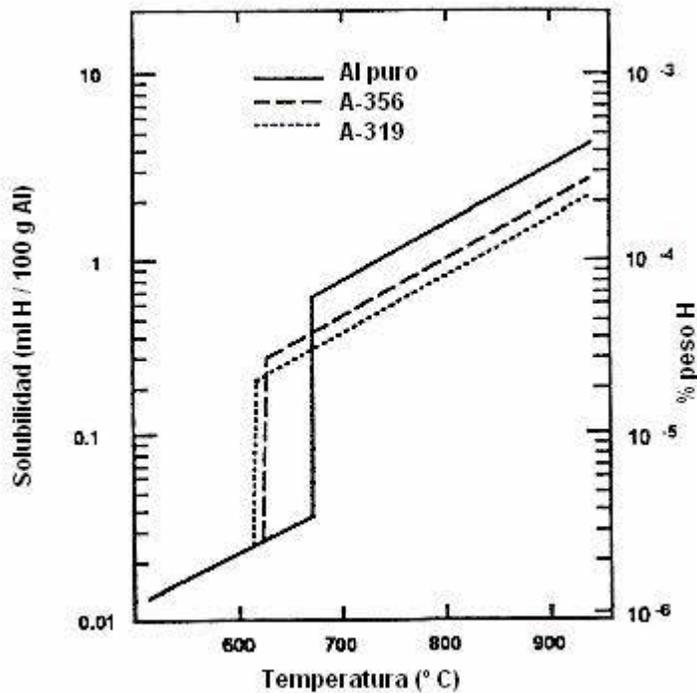
La Figura 1.7 <sup>(8)</sup> muestra la solubilidad de hidrógeno en aluminio puro en función de la temperatura, a una presión parcial de hidrógeno de una atmósfera.



**Figura 1.7 Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro (ml de H<sub>2</sub> por cada 100 g de Al) <sup>(8)</sup>.**

Como se ha mencionado, uno de los factores que determinan la cantidad de hidrógeno disuelto en cierta aleación, es su composición química. La adición de elementos aleantes modifica la solubilidad del hidrógeno. Algunos elementos como el silicio, zinc, cobre y manganeso disminuyen la solubilidad del hidrógeno en aluminio; y algunos otros, como el magnesio, titanio, níquel y litio la incrementan.

Los elementos de aleación no cambian el comportamiento de la solubilidad del hidrógeno por debajo del punto de fusión, sin embargo, por arriba de este las curvas de solubilidad presentan cierto desplazamiento con respecto de la correspondiente para el aluminio puro. Por ejemplo, la Figura 1.8 <sup>(8)</sup> muestra que para las aleaciones 356 y 319, donde los elementos principales de aleación son el silicio y el cobre, las cuales tienen puntos de fusión menores al aluminio puro, provocan un decremento en la solubilidad de hidrógeno con respecto al aluminio puro.



**Figura 1.8 Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro, A356 y A319 (ml de H<sub>2</sub> por cada 100 g de Al) <sup>(6)</sup>.**

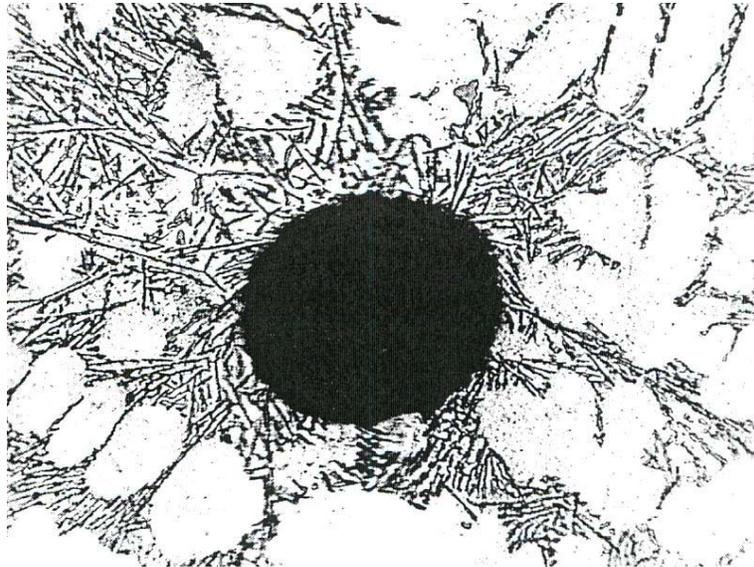
Es de vital importancia el control de la concentración final de hidrógeno en el aluminio fundido, ya que al descender la temperatura durante la solidificación de la pieza, la solubilidad del hidrógeno disminuye notablemente. El hidrógeno tiende a salir del metal líquido, pero generalmente por el tiempo de solidificación tan corto, el hidrógeno queda atrapado en el interior de la pieza en forma de burbujas, llamadas porosidades. Este defecto genera en la pieza metálica obtenida, principalmente: disminución en las propiedades mecánicas y mal aspecto superficial.

El aluminio puro al solidificar solo retiene aproximadamente 5% del hidrógeno presente en el baño líquido, y el 95% restante escapa del baño. Este es el principal motivo por el cual debe eliminarse el hidrógeno del aluminio aún en estado líquido; para evitar la presencia de porosidades y por consecuencia el rechazo de piezas coladas. Para aleaciones de aluminio con aleantes como el silicio y el cobre, la cantidad de hidrógeno retenido al solidificar aumenta hasta valores del 7%, presentando una notable tendencia a presentar poros al solidificar.

### 1.5.2.1 POROSIDADES

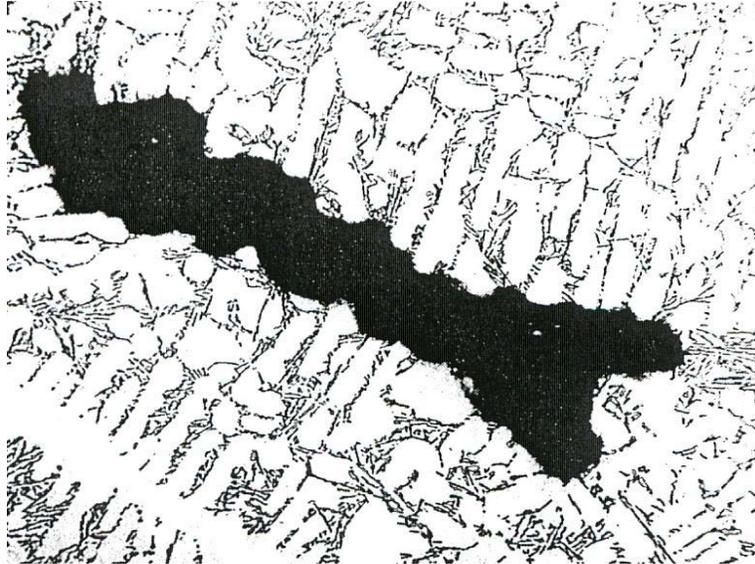
Las porosidades son quizá los defectos mas comúnmente presentes en piezas coladas, siendo una de las principales causas de rechazó de piezas. Cabe señalar que la presencia de estas porosidades se debe a dos causas: la retención de gases y la contracción durante la solidificación del metal.

La nucleación de burbujas de hidrógeno en el aluminio líquido es un proceso extremadamente difícil, ya que es necesario tener concentraciones muy altas de hidrógeno disuelto; este tipo de porosidad por retención de gas durante la solidificación, ocurre con menor frecuencia de lo que se supone normalmente. La Figura 1.9 <sup>(8)</sup> muestra un poro formado por la retención de hidrógeno en la aleación Al-8%Si, la cual presentó una concentración de 0.8 ml de H<sub>2</sub> /100 g Al. Es evidente la forma esférica de este hueco formado, lo cual hace fácil su identificación.



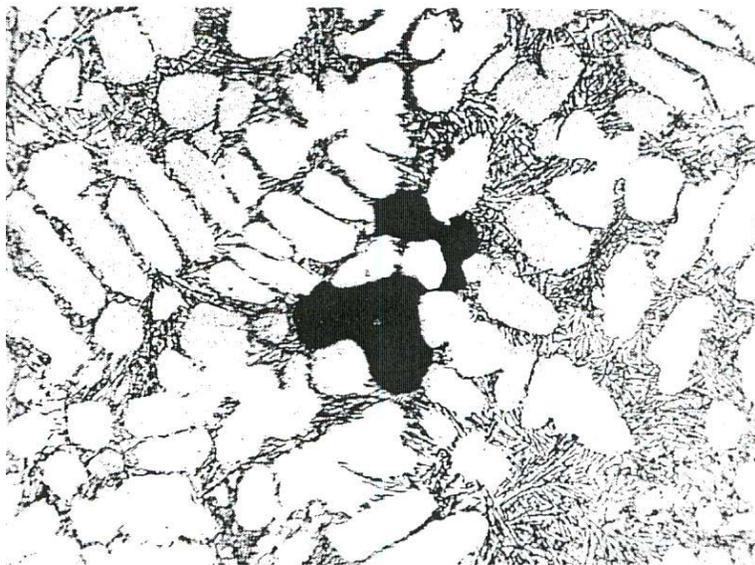
**Figura 1.9 Poro formado por la retención de hidrógeno en la aleación Al-8% Si <sup>(8)</sup>.**

Por otra parte, la formación de porosidad por contracción pura, denominada comúnmente como macro ó microchupe; se presenta generalmente en los canales entre dendritas, donde el líquido residual presente en estos canales se enfría y contrae lejos de la superficie de las dendritas, dejando huecos alargados de gran tamaño. En algunos casos hay poros tan grandes que abarcan varias dendritas o aún granos, este tipo de poro se puede observar en la Figura 1.10 <sup>(8)</sup>.



**Figura 1.10 Macrorechupe formado por contracción pura en la aleación Al-8% Si <sup>(6)</sup>.**

Virtualmente la mayoría de la porosidad encontrada en fundiciones se debe a una combinación de gas retenido y de contracción. La mayoría de los microrechupes encontrados en piezas coladas se deben a esta combinación. Estos poros ocurren típicamente en las regiones interdendríticas, que son las últimas zonas en solidificar. La solidificación se lleva a cabo progresivamente sobre la superficie de los brazos de dendritas, que tienen una menor temperatura que el líquido residual. Conforme avanza dicha solidificación el líquido residual se hace cada vez más escaso, enfriándose y contrayéndose la proporción de líquido localizada entre los brazos de la dendrita, generando microrechupes al finalizar la solidificación.



**Figura 1.11 Microrechupe formado por la combinación de contracción y retención de gases <sup>(6)</sup>.**

El tamaño del poro estará definido por el espaciamiento dendrítico; ya que dependiendo del espacio disponible será la dimensión que el poro formado puede alcanzar. La Figura 1.11 <sup>(8)</sup> muestra un poro formado por la combinación de estos dos fenómenos. Estos poros pueden variar de tamaño, desde algunos micrones hasta varios cientos.

### **1.5.2.2 EFECTO DE LA POROSIDAD SOBRE LAS PROPIEDADES**

La porosidad es una característica indeseable en la calidad de la pieza, ya que degrada las propiedades mecánicas y físicas del metal, tanto en la pieza moldeada como en su manejo en estado líquido. A continuación, se mencionan las principales propiedades que sufren afectación directa por la presencia de este defecto.

#### **Propiedades mecánicas.**

Es evidente el efecto negativo del hidrógeno y de la porosidad resultante en las propiedades mecánicas del material. En la Figura 1.12 <sup>(8)</sup>, se muestra claramente el efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas para una aleación A356 moldeada en arena. Tanto la resistencia a la tensión como el porcentaje de elongación, disminuyen notablemente cuando la concentración de hidrógeno en el material es mayor. Por otra parte, el esfuerzo de fluencia se ve levemente afectado, puesto que esta propiedad está más relacionada con el estado metalúrgico de la matriz, que a los defectos en la estructura.

Siempre será más factible la presencia de microporosidades dispersas en todo el volumen de una pieza colada; que alguna macroporosidad localizada en cierta zona de esta. La presencia de poros de gran tamaño afecta de manera más crítica las propiedades mecánicas del material, al carecer de toda homogeneidad en su estructura.

La Figura 1.12 <sup>(8)</sup>, hace evidente que al realizar la solidificación a velocidades de enfriamiento grandes se obtienen los mejores valores de resistencia a la tensión y porcentaje de elongación. Al solidificar rápidamente, se favorece la rápida nucleación y saturación en todo el volumen de la pieza, de pequeños cuerpos dendríticos. La obtención de una microestructura dendrítica más fina, favorece la formación de microrechupes dispersos en toda la pieza. Aunque es un defecto, al encontrarse disperso en toda la pieza, la estructura presenta cierta homogeneidad.

Caso contrario lo que ocurre al enfriar lentamente, ya que se da el tiempo suficiente para que la primeras dendritas formadas puedan crecer de tamaño, generando una mayor distancia dendrítica; los poros formados son de mucho mayor tamaño y menos dispersos, generando una heterogeneidad del material; por lo cual, las propiedades mecánicas decaen drásticamente.

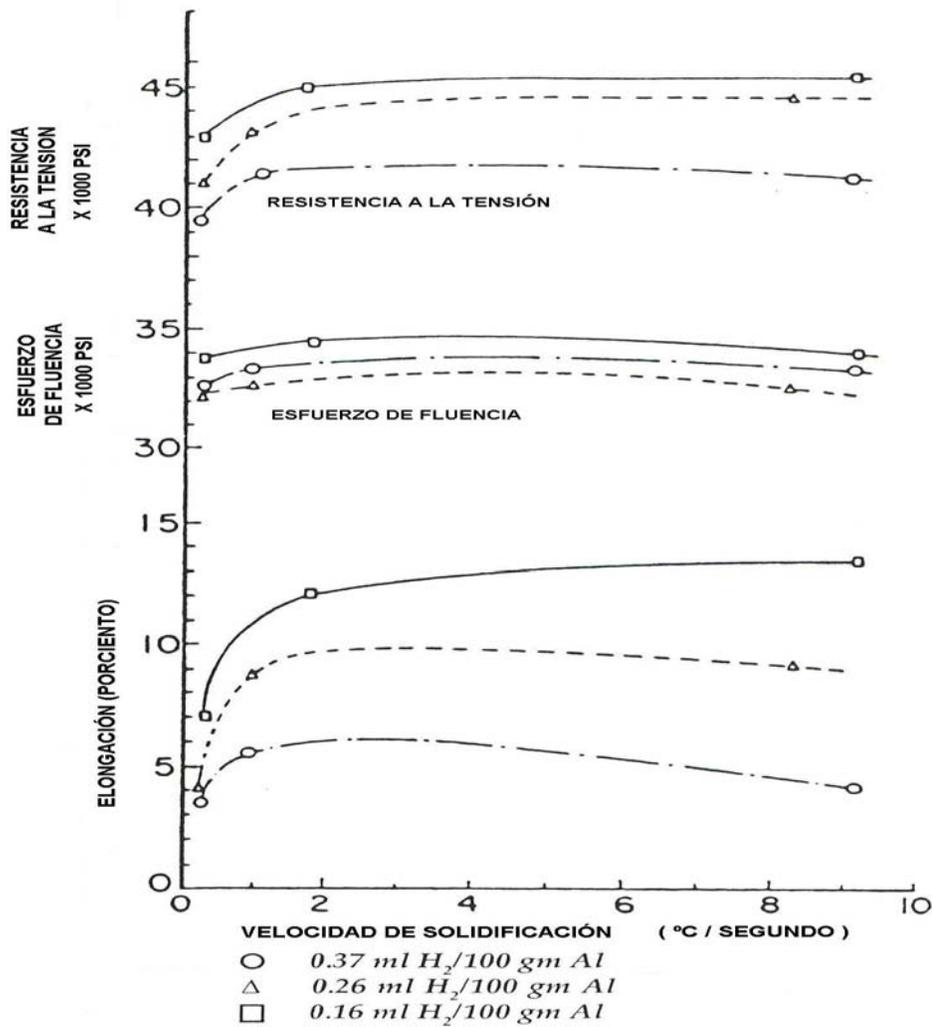


Figura 1.12 Propiedades mecánicas de una aleación A356 moldeada en arena, con varias concentraciones de hidrógeno <sup>(8)</sup>.

### Fatiga e Impacto.

En piezas coladas de aluminio, la porosidad puede llegar a ser el origen de grietas por fatiga bajo ciertas condiciones de carga. Por lo tanto, la porosidad llega a reducir la resistencia a la fatiga. Similarmente, los poros superficiales o internos pueden actuar como concentradores de esfuerzos al aplicarse una carga de impacto, provocando la disminución de la resistencia al impacto de la aleación.

## Aspecto Superficial

La porosidad llega a ser particularmente evidente en una superficie maquinada, y puede ser la causa del rechazo de piezas donde el aspecto superficial es crítico. Las superficies pulidas y anodizadas son particularmente susceptibles a los defectos causados por la porosidad.

## Ampollamiento

Las fundiciones que presentan cantidades muy grandes de porosidad pueden llegar a ampollarse, cuando al tratarse térmicamente el gas atrapado en el interior del poro se expande.

## 1.6 MÉTODOS DE REMOCIÓN DE HIDRÓGENO

En la industria de la fundición de aluminio, el mejoramiento de la calidad en los productos fundidos durante su fabricación depende particularmente del nivel de impurezas presentes, tales como: 1) contenido de hidrógeno, 2) contenido de metales alcalinos y 3) contenido de inclusiones no metálicas. Por esta razón, las operaciones de refinación del aluminio líquido están dirigidas a obtener los niveles requeridos de estas impurezas.

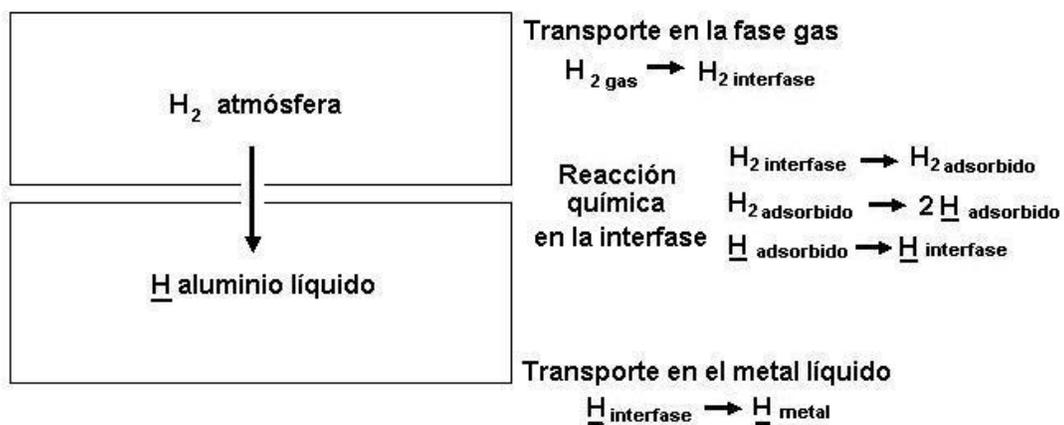
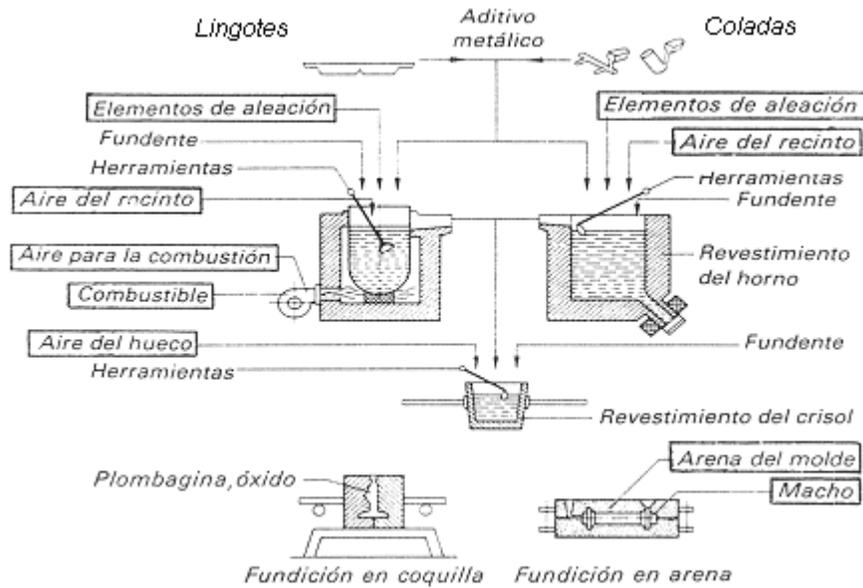


Figura 1.13 Etapas durante la disolución de hidrógeno en metal líquido.

Un paso básico en el control del hidrógeno es la prevención de la disolución de este gas en el aluminio líquido. Es costoso eliminar el hidrógeno de las aleaciones líquidas, de ahí que ningún esfuerzo debe escatimarse para reducir al mínimo su absorción en el baño. La Figura 1.13 muestra la serie de etapas que ocurren durante la disolución del hidrógeno en un baño de metal fundido.



**Figura 1.14 Fuentes de humedad para la absorción de Hidrógeno durante el manejo y fusión de aluminio para colada <sup>(9)</sup>.**

Algunas de las fuentes que durante la fusión y preparación del aluminio pueden añadir hidrógeno al metal líquido son: humedad atmosférica, refinadores de grano, herramientas húmedas, medio de moldeo, productos de combustión, etc.; estos factores, junto con la oxidación atmosférica normal, contribuyen a la formación de óxidos e inclusiones. En la Figura 1.14 se muestran las principales fuentes proveedoras de humedad durante el procesamiento y manejo de un baño de aluminio líquido.

Cabe puntualizar que la atmósfera circundante al horno es la principal fuente de humedad. Es interesante señalar, que un metro cúbico de aire puede contener hasta 13 gramos de vapor de agua. Si este vapor de agua reacciona con el aluminio fundido, se libera más de 1 gramo de hidrógeno; y esta cantidad sería suficiente para causar porosidades en toda una tonelada de aluminio vaciado.

El uso del desgasificado y la opción de cual tecnología usar, dependerán del nivel de hidrógeno deseado; y este está determinado en función del uso final a que estará destinado el componente. El costo de las piezas variará en función del uso final del producto manufacturado, desde una pieza de ornamentación hasta una pieza aeroespacial. A pesar de tan grande diferencia de aplicación, estas requieren de un control de calidad bajo los mismos parámetros.

El desgasificado se debe utilizar siempre conjuntamente con un método para medir el nivel de hidrógeno; si esto no se hace, el fundidor no tiene un método confiable y reproducible de saber cuándo se ha alcanzado el nivel requerido del hidrógeno.

### 1.6.1 MÉTODOS DE DESGASIFICADO

Aunque existen diversos métodos para desgasificar baños de aluminio líquido, todos caen en uno de los tres tipos generales enlistados a continuación:

- Desgasificado natural
- Desgasificado al vacío
- Desgasificado por purgado de gas

#### 1.6.1.1 DESGASIFICADO NATURAL

Un baño de aluminio líquido perderá hidrógeno hacia la atmósfera si este está sobresaturado de hidrógeno. El desgasificado natural ocurre muy lentamente, generalmente requiere de varias horas para alcanzar grados útiles de remoción. Por lo tanto, esta técnica es demasiado lenta para ser usada en la práctica.

El desgasificado natural no ocurre en todos los casos, puesto que el baño debe estar sobresaturado. Las aleaciones de aluminio líquido no alcanzan a menudo sus límites de saturación con hidrógeno bajo condiciones de proceso comunes, y es así que la sobresaturación con hidrógeno y el desgasificado natural subsiguiente pueden ocurrir solamente en situaciones especiales.

El desgasificado natural es favorecido con temperaturas bajas y con atmósferas totalmente libres de humedad sobre el baño. Una forma de promover el desgasificado natural es bajar la temperatura del baño por un período de varias horas.

#### 1.6.1.2 DESGASIFICADO AL VACÍO

La eliminación de la presión atmosférica sobre el baño de aluminio líquido fomenta la formación en este, de burbujas de hidrógeno que se extraen a través de un sistema de bombeo. El desgasificado también se promueve a través de la disposición de una atmósfera totalmente libre de hidrógeno. La Figura 1.15 <sup>(8)</sup> muestra un dispositivo industrial para realizar desgasificado al vacío al aluminio fundido. Para realizar una desgasificación en un período razonable de tiempo, se introduce al baño un flujo de nitrógeno puro y seco por medio de una lanza en el fondo del baño; esto revuelve el aluminio líquido y ayuda a que las burbujas de remoción puedan superar la presión metalostática y con esto facilitar la remoción del hidrógeno presente. Este tipo de proceso requiere de una inversión grande de dinero, pero es un método no contaminante. Con esta técnica se pueden lograr concentraciones del hidrógeno de alrededor de 0.08 ml de H<sub>2</sub>/ 100g Al.

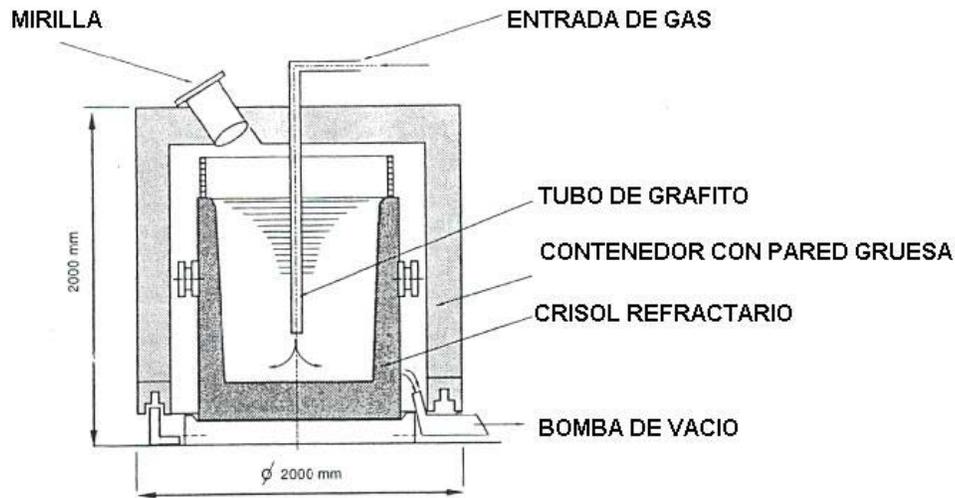


Figura 1.15 Unidad de desgasificado al vacío <sup>(8)</sup>.

### 1.6.1.3 DESGASIFICADO POR PURGADO DE GAS

Este tipo de tratamiento se realiza por medio de la inyección de un gas inerte, un gas reactivo o una combinación de ambos, en el aluminio líquido. Por la diferencia de concentraciones del hidrógeno en la burbuja de gas y el disuelto en el aluminio, se promueve el transporte másico de esta especie, siendo este el principio fundamental en la remoción del hidrógeno.

La remoción de hidrógeno del baño se realiza mediante la inyección y formación de burbujas de gas de remoción, libres de hidrógeno. El hidrógeno presente en el aluminio líquido se encuentra en forma atómica, no como hidrógeno molecular ( $H_2$ ). Los átomos de hidrógeno disueltos en el seno del líquido se transportan por convección hacia una zona adyacente a la intercara entre la burbuja y el metal líquido (capa límite), donde la concentración de hidrógeno decae. Una vez que los átomos de hidrógeno se encuentran en la capa límite, difunden a través de ella hacia la superficie de la burbuja donde se adsorben y combinan para formar moléculas de hidrógeno ( $\underline{H} + \underline{H} \rightarrow H_2 \text{ (gas)}$ ). Estas moléculas a continuación difunden de la superficie de la burbuja hacia el seno de la burbuja de gas, donde se acumula el hidrógeno extraído del aluminio.

En su camino ascendente hacia la superficie del baño se producen continuamente esta serie de mecanismos de transporte, terminando con la extracción del gas de purgado en la atmósfera. Por consiguiente, se pueden resumir en la siguiente lista todas las etapas de transporte presentes en esta técnica de remoción de impurezas disueltas; lo cual constituye la cinética global del proceso de deshidrogenación <sup>(10)</sup>:

- 1) transporte convectivo de los átomos de hidrógeno disueltos en el aluminio líquido hacia una zona cerca de la interfase metal líquido/ superficie de la burbuja del gas de remoción.
- 2) transporte difusivo de los átomos de hidrógeno a través de la capa límite entre el metal líquido/ burbuja de gas,
- 3) adsorción química de los átomos de hidrógeno sobre la superficie de la burbuja,
- 4) reacción de combinación entre de los átomos de hidrógeno para formar moléculas de dicho gas ( $H + H \rightarrow H_2$ ),
- 5) transporte difusivo del hidrógeno molecular hacia el seno de la burbuja y, remoción del hidrógeno contenido en las burbujas en la superficie del baño.

La etapa más lenta será la que controle la cinética de desgasificación y, por lo tanto, determinará el costo de la desgasificación y la productividad del proceso.

La formación de una burbuja de gas en metales líquidos no es una cuestión fácil, ya que la elevada tensión superficial presente en la intercara metal líquido-gas, impide la fácil fragmentación del gas de remoción para la formación de dichas burbujas. Es aquí donde radican las principales diferencias entre las diversas técnicas de desgasificado, como el tipo de gas que se introduce al metal líquido y en cómo se forman las burbujas. De hecho resulta que la eficiencia del desgasificado es fuertemente dependiente del tamaño de burbuja y este depende de cómo las burbujas se generen en el baño. La eficiencia puede también depender del tipo de gas usado.

Varios gases y mezclas de gas pueden ser empleados. Por supuesto, los gases deben estar totalmente libres de humedad o introducirán hidrógeno en el baño. Entre los más comunes están el nitrógeno y el argón, puros y secos.

El cloro puro fue utilizado extensivamente en el pasado, pero su uso cada vez ha ido en decremento debido a su toxicidad y a los efectos corrosivos sobre el equipo. También se utilizan mezclas de gas inerte con un gas reactivo, tales como:

99% Ar –1%  $Cl_2$

90%  $N_2$  –10%  $Cl_2$

80%  $N_2$  –10%  $Cl_2$  –10%CO

90% Ar –10%  $Cl_2$

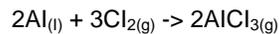
70%  $N_2$  –30%  $Cl_2$

Las mezclas de nitrógeno y freón-12 ( $CCl_2F_2$ ) han venido en uso común variando la concentración de freón desde 5% a 30%. El hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ), también ha demostrado ser eficaz para desgasificar.

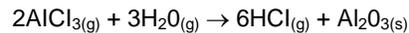
### 1.6.2 TRATAMIENTO CON GAS REACTIVO O INERTE

Los gases empleados para los tratamientos de desgasificado caen en dos tipos: gases inertes tales como argón o nitrógeno que tienen nula o una reactividad muy pequeña con aluminio líquido y, gases reactivos tales como el cloro, freón, flúor o mezclas de éstos con nitrógeno o argón. Los gases reactivos experimentan una reacción química con aluminio líquido, elementos de aleación o compuestos usados durante el proceso de fusión del metal.

En el tratamiento con gas reactivo, la reacción química más importante implica la acción del cloro para formar cloruro de aluminio, el cual es gaseoso por arriba de los 183° C según la reacción:



Mientras las burbujas de cloruro de aluminio ascienden a través del metal líquido, absorben el hidrógeno disuelto en el baño, mediante los mecanismos descritos anteriormente. Grandes desventajas de usar cloro son la contaminación y la corrosión de las estructuras metálicas. Este daño se debe a que el cloruro de aluminio desprendido al entrar en contacto con el aire húmedo de la atmósfera sobre el baño, se hidroliza por la reacción:



El resultado es la formación de ácido clorhídrico y óxido de aluminio. La toxicidad y los efectos destructivos del tratamiento con cloro pueden ser reducidos diluyéndolo con un gas inerte, generalmente nitrógeno.

El cloro no necesariamente se debe introducir directamente al baño. Puede ser adicionado por la descomposición química de tabletas de hexacloroetano o de freon-12. El hexacloroetano también tiene la desventaja de generar humos desagradables. Se debe tener cuidado al usar freón-12, puesto que se descompone para formar carbono, cloro y flúor. El volumen de carbono formado es tal que puede tapar rápidamente cualquier sistema poroso del difusor y hacer al desgasificado ineficaz.

Una de las grandes ventajas de usar un gas reactivo o una mezcla de gases reactivos e inertes, es que ejercen un efecto de limpieza sobre el baño líquido. Los cloruros formados en la burbuja de gas, disminuyen la tensión superficial entre el gas y el aluminio, de modo que las inclusiones de óxidos se pegan a las burbujas y son retiradas por flotación del baño. El gas inerte también tiene un efecto de limpieza, pero este se incrementa mucho al mezclarlo con un poco de gas reactivo.

Si las burbujas son más grandes, la eficiencia de desgasificado es baja (desgasificado con lanza). El cloro en este caso asiste a la transferencia del hidrógeno en la burbuja del gas de remoción. Cuando las burbujas son pequeñas, el retiro del gas es altamente eficiente, hay evidencia de que un gas reactivo puede retrasar realmente el retiro de hidrógeno.

El cloruro de magnesio forma una capa en la superficie de la burbuja e impide que los átomos de hidrógeno crucen la superficie y se depositen en el interior de la burbuja. De manera similar, la desgasificación con un gas reactivo no es posible si el baño contiene estroncio.

Ningún desgasificado ocurre hasta que todo el estroncio ha sido removido. El mecanismo implica la formación de una capa sólida de cloruro de estroncio en la superficie de la burbuja que evita la transferencia de hidrógeno hacia la burbuja de gas. Esto mismo ocurre con cualquier agente desgasificante que contenga flúor, ya que fluoruro de estroncio formado desempeña un papel en la prevención del desgasificado.

Por consiguiente es necesario desgasificar antes de realizar la modificación, si se va a utilizar un gas reactivo. La opción entre un gas inerte o reactivo no es simple. Si la limpieza del baño durante el desgasificado es una prioridad, la opción es usar un gas reactivo. Aunque también se pueden usar sistemas excelentes de filtración para limpiar el líquido. Si la limpieza del baño no es importante, la opción es elegir la técnica con mayor eficiencia. Finalmente, no importa que eficiencia tenga el desgasificado, solamente un gas inerte se debe emplear en la presencia del estroncio.

### **1.6.3 FORMAS DE INTRODUCIR EL GAS DE REMOCIÓN**

#### **1.6.3.1 TABLETAS**

En el desgasificado por tabletas, el gas de purgado es proporcionado por la adición al baño de píldoras en forma sólida. Las píldoras, están compuestas de productos químicos que al ser añadidos al baño se descomponen térmicamente para generar burbujas de gas en el metal líquido, estas pastillas se agregan por una campana perforada.

El desgasificador sólido mas conocido es el hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ), que se descompone a temperaturas por arriba de los 700° C. El gran inconveniente de estos materiales es que tienen la facilidad de absorber humedad, por lo que se deben almacenar en una atmósfera seca, para evitar que al usarlos estos sean una fuente proveedora de hidrógeno al baño líquido.

Este es el método menos controlable de desgasificado, puesto que la descomposición es rápida y muy difícil de controlar. Por consiguiente, puede ser necesario realizar varios tratamientos con estos compuestos, para obtener el tiempo de reacción suficiente para lograr un buen grado de desgasificado. La formación de escoria y generación de humos desagradables se promueve con este método. A pesar de estas desventajas, el desgasificado por tableta es a menudo conveniente en el tratamiento de baños pequeños y donde un desgasificado de alto grado no se requiere.

### 1.6.3.2 LANZAS DE GRAFITO

El gas del tratamiento se puede introducir en el baño líquido de varias maneras. La más simple, pero la menos eficaz, es utilizar una lanza recta de grafito. Tal lanza produce burbujas grandes con diámetros del orden de 2-3 cm de diámetro. La Figura 1.16 <sup>(8)</sup> muestra como las burbujas ascienden cerca del cuerpo de la lanza, por tanto, se presenta un contacto mínimo con el metal fundido. Entonces, para desgasificar con eficiencia un baño grande, varias de estas lanzas deben ser utilizadas, ya que si se emplea solamente una, esta debe moverse en el baño de metal líquido constantemente.

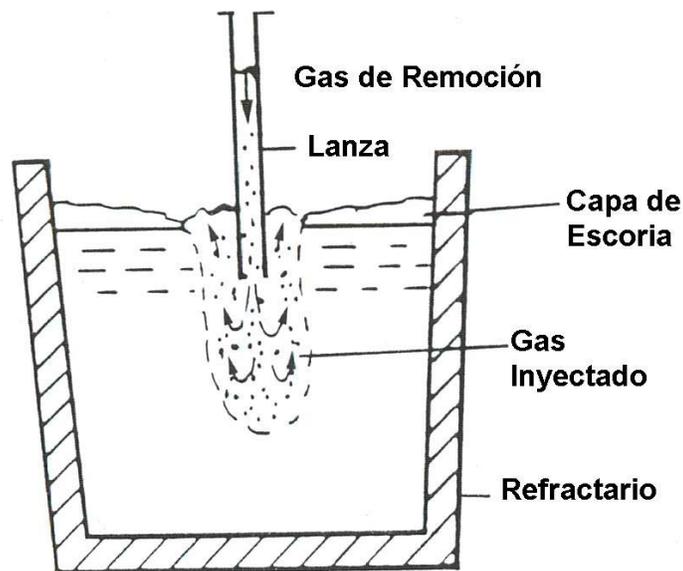


Figura 1.16 Inyección de gas con lanza de grafito <sup>(8)</sup>.

### 1.6.3.3 LANZA CON TAPÓN POROSO

Una dispersión mucho más fina de las burbujas del gas se puede alcanzar con el uso de un tapón poroso de grafito. Estos tapones se atornillan sobre la punta de la lanza de grafito. Sin embargo, se sigue presentando el mismo problema que con una lanza simple, las burbujas tienden a subir cerca del cuerpo de la lanza, de ahí que sea necesario el agitar el baño alrededor de la lanza o usar un arreglo de varias de estas lanzas con tapón para que las burbujas entren en contacto con el mayor volumen de metal.

### 1.6.3.4 PROPELA ROTATORIA

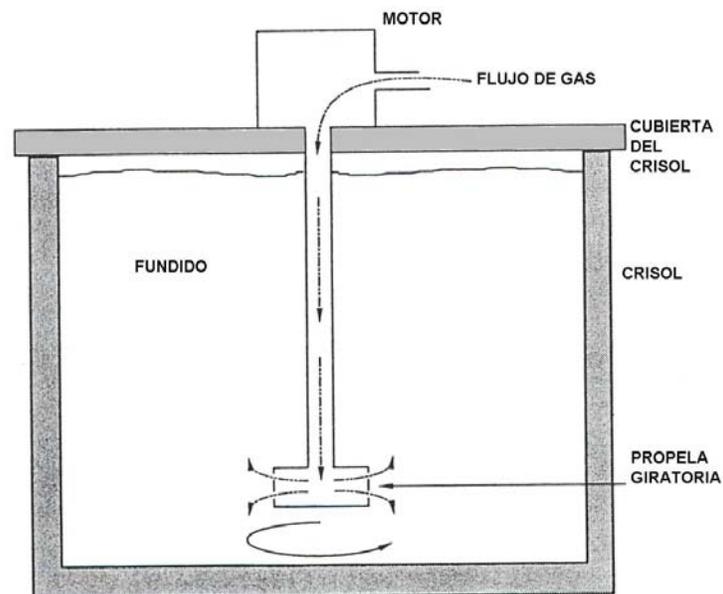
De entre lo métodos existentes de remoción de hidrógeno por inyección de gas destaca una variante, la inyección de gases mediante una propela rotatoria. Este es el método más sofisticado y eficiente disponible para el uso en la fundición y, se debe usar cuando se requieren piezas con altos requerimiento de calidad. En el desgasificado con propela rotatoria se introduce el gas de tratamiento en el aluminio líquido a través de un

inyector especial, del cual su cabeza rota rápidamente, produciendo una nube de burbujas muy finas (3-6 mm) y, después las dispersa a través de todo el volumen del baño líquido.

La inyección de gases mediante una propela rotatoria es quizá el proceso de mayor uso para la deshidrogenación de un baño. Se refiere al uso de una propela giratoria dentro del baño de aluminio, que inyecta un gas (inerte o reactivo) y genera la formación y dispersión en forma homogénea o casi homogénea de pequeñas burbujas dentro del baño. Para conseguir una distribución homogénea de las burbujas dentro del horno, se requiere de una apropiada agitación del baño (sin generación de un vórtice pronunciado). Es necesario controlar algunos parámetros importantes del proceso como la velocidad de la propela, el flujo de gas, profundidad de inmersión de la flecha, entre otros.

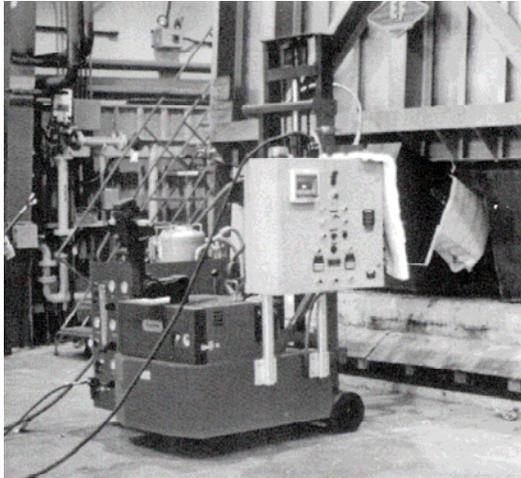
Los niveles finales del hidrógeno alcanzados dependen del contenido inicial del hidrógeno, flujos del gas de remoción, velocidad de rotación, el tamaño del recipiente, y del tiempo del tratamiento. Los niveles de hidrógeno alcanzados a menudo por este proceso, se encuentran por debajo de  $0.05 \text{ ml H}_2 / 100\text{g Al}$ .

La Figura 1.17 muestra un diagrama de las partes esenciales de un desgasificador con propela rotatoria.

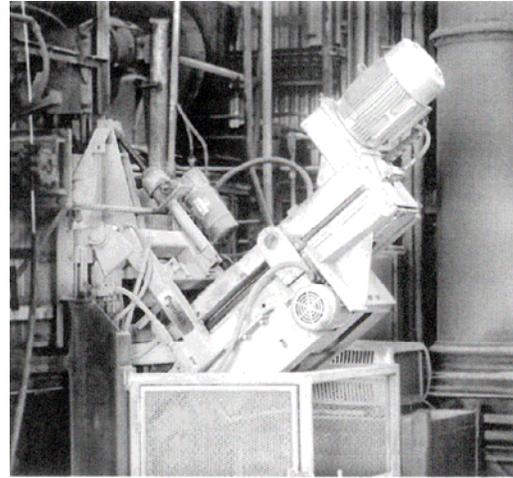


**Figura 1.17 Esquema de unidad de desgasificado con propela rotatoria <sup>(8)</sup>.**

Unidades industriales de desgasificado se han diseñado para colocarse en la tapa de hornos de crisol o bien para la operación continua en hornos de reverbero, como se muestra en las Figuras 1.18a, b, c, d <sup>(12)</sup>. Este tipo de unidades de desgasificado han sido diseñadas para reemplazar métodos convencionales de desgasificado como las lanzas de grafito y los tapones porosos.



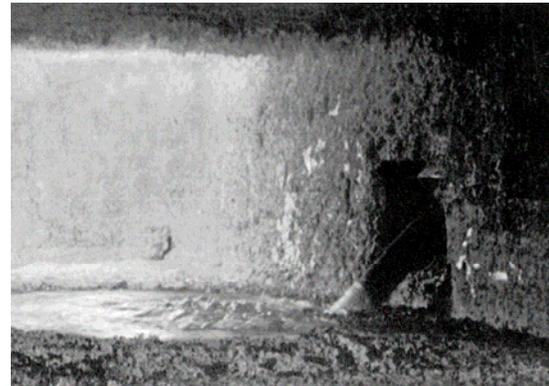
**Figura 1.18a Unidad PHD-50 en posición para tratamiento en un horno de crisol.**



**Figura 1.18b Unidad HD-2000 en posición para tratamiento en un horno de reverbero.**



**Figura 1.18c Posición del inyector ensamblado en un horno de reverbero vacío.**



**Figura 1.18d Inyector ensamblado durante el tratamiento del metal.**

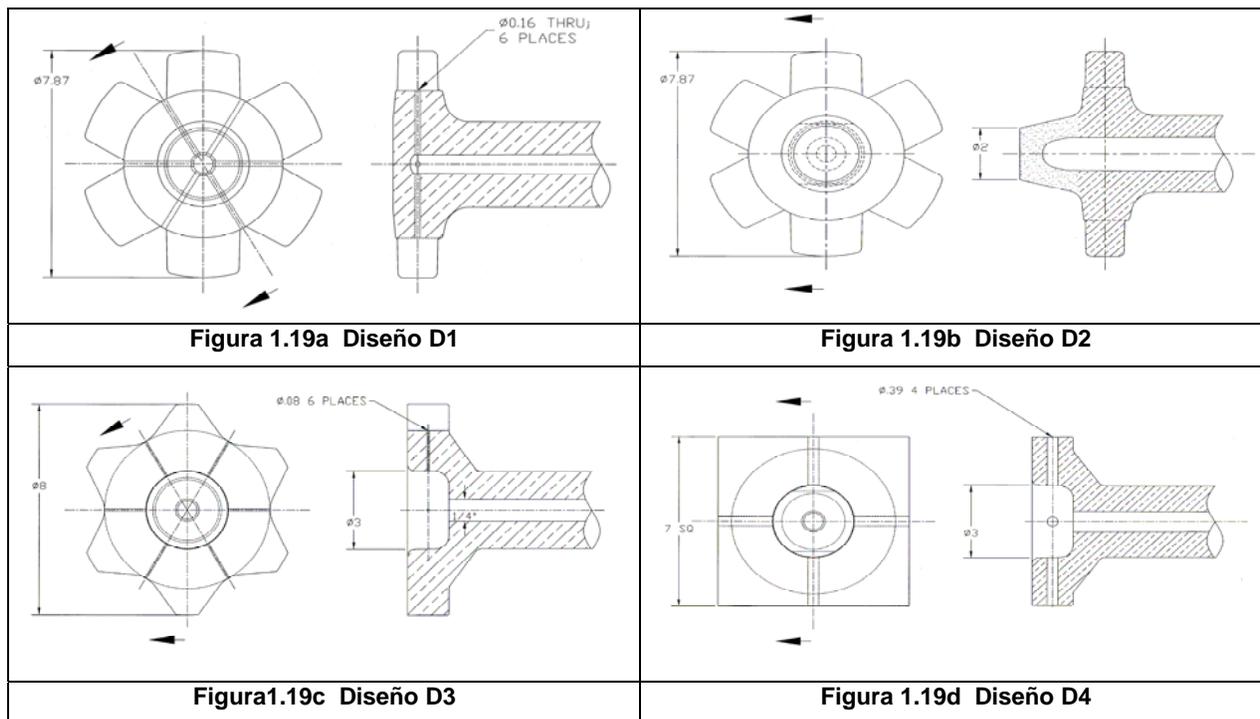
Como se mencionó anteriormente la gran ventaja que muestra el desgasificado vía propela rotatoria con respecto a otras técnicas de desgasificado convencionales es la formación de burbujas pequeñas, además de una mejor distribución de estas burbujas en el fundido desde su entrada al baño, hasta su salida del mismo, fenómeno que no ocurre en ninguno de los otros métodos.

De los cuatro métodos comúnmente usados para introducir agentes desgasificantes en baños de aluminio líquido, el desgasificado por lanza y por tabletas son los más ineficaces. En la Tabla 1.7<sup>(11)</sup> se muestran las principales características de estos sistemas de desgasificado.

**Tabla 1.7 Características de diferentes sistemas de inyección de gas en metal líquido <sup>(11)</sup>.**

Sistema	Gas de Tratamiento	Eficiencia de Remoción	Inversión de Capital	Nivel de Desgasificado	Riesgo al Operario
Tabletas	Reactivo	Alta	Ninguno	Moderado	Alta
	Inerte	Moderada	Ninguno	Moderado	Alta
Lanzas	Reactivo	Alta	Baja	Moderado	Moderada
	Inerte	Baja	Baja	Bajo	Moderada
	Mezcla	Moderada	Baja	Bajo	Moderada
Propela Rotatoria	Mezcla	Alta	Moderada	Alto	Baja
	Inerte	Alta	Moderada	Alto	Baja
Vacío	Ninguno	Alta	Alta	Moderado	Baja

El desgasificado por medio de una propela rotatoria, tanto el tamaño de burbuja como la distribución de estas en el metal líquido, están fuertemente influenciadas por el diseño de la propela, en como esta fragmenta el flujo de gas inyectado y lo convierte en una nube de pequeñas burbujas, distribuidas homogéneamente en todo el volumen del baño. Es así, que la geometría de la propela es un factor que modifica la eficiencia de desgasificado bajo las mismas condiciones de operación. Las Figuras 1.19 a, b, c, d <sup>(13)</sup> muestran diferentes tipos de propela para el proceso de desgasificado.



## 1.7 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

La industria manufacturera de bienes con componentes fabricados en aluminio colado, continúa con un esfuerzo permanente por mejorar y alcanzar la excelencia en la calidad de sus productos. Es así, que se requiere de un control de calidad tendiente a la excelencia, por lo cual la industria de la fundición ha visto la necesidad de estudiar, desarrollar e implementar procesos que tengan como consecuencia la obtención de producciones de gran calidad.

Las técnicas de desgasificación de aluminio líquido han tomado importancia relevante en el proceso de manufactura de piezas, como una técnica de control en la calidad de las piezas durante su proceso de fabricación. La remoción de gas atrapado y de inclusiones en el metal, es esencial para el aseguramiento de una calidad excelente.

Entre los métodos existentes para la eliminación de gases en baños de aluminio, se tienen los tratamientos ultrasónicos, los tratamientos al vacío, los tratamientos con fundentes y los tratamientos de inyección de gas. Los tres primeros son muy poco usados a escala industrial por su relativa ineficiencia; mientras que la inyección de gas con su serie de variantes es el método de mayor uso general.

Por esto, este trabajo se enfocó a estudiar de manera particular la inyección de gases mediante una propela rotatoria, que es el proceso de mayor uso para la remoción de hidrógeno de baños líquidos y técnica central de estudio en este trabajo. Considerando que esta técnica de inyección de gas presenta los más altos rendimientos en el desgasificado de aluminio, hay pocos estudios nacionales en este campo, por lo cual, es indispensable el uso de herramientas que ayuden al desarrollo y mejoramiento de esta técnica.

Hoy en día, en México llevar a cabo investigación en planta o en laboratorio representa una inversión de capital elevada, muy difícil de solventar en la actualidad por la difícil situación económica por la cual atraviesa el país y más específicamente la industria de la fundición. Por lo cual, la modelación matemática y física se convierten en atractivas opciones de análisis de procesos, con las que cuenta el ingeniero para poder entender la influencia de diversas variables de proceso. De ahí la decisión de estudiar mediante el modelado matemático la cinética de desgasificación con propela rotatoria.

## 1.8 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de tesis fue desarrollar un modelo matemático riguroso y fundamental basado en los principios termodinámicos y cinéticos gobernantes en la deshidrogenación, que permita simular la transferencia de masa durante el desgasificado de una aleación A-356, por medio del sistema de propela rotatoria; y así, poder evaluar variables de proceso como: (diámetro de burbuja, temperatura, profundidad de inmersión de la propela, cantidad de metal tratado, concentración inicial de hidrógeno y flujo de gas de remoción inyectado); determinando las condiciones óptimas para llevar a cabo la remoción de hidrógeno del aluminio fundido.

El modelo matemático se desarrolló buscando satisfacer los siguientes objetivos particulares:

- Aplicar el modelo para analizar el efecto de cada variable de proceso (diámetro de burbuja, temperatura, profundidad de inmersión de la propela, cantidad de metal tratado, concentración inicial de hidrógeno y flujo de gas), sobre la cinética de deshidrogenación de la aleación A-356.
- Analizar la sensibilidad del modelo matemático a las correlaciones empíricas del coeficiente de transferencia de masa empleadas.

Derivado de las exigencias tecnológicas de las aplicaciones del aluminio, la industria de la fundición de aluminio orienta gran parte de sus esfuerzos en mejorar los procesos de refinación, como lo es la desgasificación. En este trabajo se busca contribuir en la búsqueda de soluciones que se apliquen directamente en problemas prácticos que se presentan la industria del país. A continuación, se presenta la investigación bibliográfica realizada con respecto a este proceso de desgasificado con propela rotatoria y, en el capítulo 3 se muestra el desarrollo de un modelo matemático fundamental que describe la influencia de las principales variables del proceso sobre la cinética de remoción de hidrógeno.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación se revisan críticamente algunos intentos previos para modelar matemáticamente el proceso de desgasificación usando una propela rotatoria:

**Metal Batch Treatment Optimization Of Rotor Running Conditions, F. Boeuf, M. Rey and E. Wuilloud, Lonza Services Ttd Research and Development, Light Metals 1993, 927-932.**

En este artículo se realizó un estudio para corroborar si resultados obtenidos en modelos físicos pueden ser usados en el tratamiento industrial de aluminio fundido con una propela rotatoria. Los objetivos de los autores fueron: 1) comparar los resultados obtenidos en un modelo físico (agua), mediante mediciones directas en aluminio líquido, 2) demostrar como estos resultados obtenidos en el modelo físico pueden ser transportados al aluminio fundido con un reducido número de pruebas y, 3) encontrar los métodos para adaptar los parámetros industriales necesarios para incrementar la calidad y productividad. Para lograr dichos objetivos describieron con la siguiente ecuación la cinética de remoción de hidrógeno:

$$\frac{dC}{dt} = K(C - C_{\infty})$$

donde la eficiencia del tratamiento ( $K$ ), puede ser representada como:

$$K = K_L \left( \frac{A}{V} \right)$$

donde:  $A$ : área interfacial,  $V$ : volumen de líquido tratado y,  $K_L$ : es la razón de intercambio entre el gas y líquido, y esta depende de la naturaleza de las interacciones físico-químicas entre el gas y el fundido.

Encontraron que la eficiencia de tratamiento esta influenciada por la composición del gas inyectado. Cuando se usa 100% Ar, el valor del flujo tiene poca influencia en  $K$ , sin embargo, al usar mezclas de Ar-Cl<sub>2</sub>, encontraron que al incrementar el contenido de cloro y del flujo de gas, se alcanzan mayores eficiencias de remoción.

Al estudiar la influencia de la cantidad de metal tratado, se encontró que si un rotor es probado en recipientes similares y bajo las mismas condiciones, las eficiencias de remoción tienen que ser solo función del volumen de metal tratado. La eficiencia específica es mayor en contenedores pequeños ya que el volumen afecta el área interfacial; al ser menor el volumen se tiene una mayor área interfacial. También, encontraron que el flujo de gas inyectado presenta gran influencia. En recipientes pequeños, al aumentar el flujo de gas, la eficiencia de remoción es mayor.

Por medio de un análisis adimensional del mecanismo de formación de la burbuja se analizó el área interfacial. Para condiciones usuales de operación industrial, encontraron que el área interfacial en el agua

varía de la misma forma que en el aluminio. Por lo tanto, un modelo de agua a escala completa es válido para establecer el desempeño de rotores, bajo condiciones de operación variables.

Para demostrar la validez de este argumento, realizaron mediciones en modelos físicos a escala industrial utilizando agua y mediciones en hornos reales (Horno de mantenimiento de 5 ton y Horno de inducción de 15 ton), comparando dos tipos de propelas. Para tal efecto, usaron la relación  $K_w/K_{Al}$ , la cual define el desempeño de las propelas en el modelo físico y en los hornos. Concluyeron que este cociente es constante en agua y en aluminio y, por lo tanto, es adecuado el simular el tratamiento de aluminio por medio de modelos en agua a escala completa.

Es importante señalar que en la parte de la influencia de la cantidad de metal tratado, lo reportado en el artículo por los autores, no coincide con los gráficos a los cuales hace referencia.

**The Use Of Rotating-Impeller Gas Injection In Aluminium Processing, C. Leroy and G. Pignault, JOM, Sep 1991, 27-30.**

En la industria, la calidad del aluminio líquido está caracterizada por tres factores: contenido de hidrógeno, contenido de elementos alcalinos y contenido de inclusiones no metálicas. Se analizó el tratamiento por inyección de gas con propela rotatoria en crisoles de traslado, hornos de espera y hornos en línea. Usando un rotor para los crisoles de traslado y dos o mas rotores para los dos últimos.

Teóricamente la remoción de impurezas por medio de la inyección de gas a un metal fundido, se clasifica en dos tipos de modelos: 1) modelos microscópicos, donde los fenómenos que ocurren en la interfase metal líquido - burbuja de gas deben ser totalmente descritos. Para lo cual se auxilian de leyes de la termodinámica, cinética, flujo de fluidos, etc., 2) modelos macroscópicos, donde solo se considera la respuesta global del sistema de tratamiento.

Con respecto al modelo microscópico, los autores se basan en los estudios para la remoción de hidrógeno en aluminio fundido, realizados por Abel Engh. Describen todos los mecanismos de transporte que deben llevarse a cabo para la remoción de impurezas del baño, desde el transporte por convección de la impureza hacia la burbuja de gas, hasta su remoción en la superficie del baño. Entre las limitaciones del modelo microscópico se encuentran las propias de la termoquímica y la dificultad de representar procesos complejos.

El modelo macroscópico considera como hipótesis básica una ecuación cinética de primer orden, para la remoción de impurezas en tratamientos no continuos (batch). Dicha ecuación es:

$$\frac{C(t) - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} = \exp(-K \cdot t)$$

donde:  $C(t)$  es la concentración instantánea,  $C_0$  es la concentración inicial,  $K$  es la velocidad de remoción y,  $C_{\infty}$  es la concentración asintótica, siendo estas dos ultimas cantidades las que controlan el proceso, y que

dependen de varias condiciones del tratamiento como: velocidad de rotación, flujos de gas, naturaleza de la aleación, temperatura, volumen y forma del horno.

Al combinar resultados de la cinética de remoción y resultados de distribución de tiempo de residencia obtenidos en un proceso continuo, obtuvieron una nueva expresión para determinar la concentración de hidrógeno a la salida:

$$\frac{C(t) - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} = \frac{1}{(1 + K\tau)^n}$$

donde:  $n$  es el número de compartimentos perfectamente agitados en el baño y  $\tau$  representa el tiempo medio de residencia. Los valores de  $K$  y  $C_{\infty}$  son obtenidos en tratamientos no continuos. Una distribución del tiempo de residencia proporciona la conexión necesaria entre resultados obtenidos en procesos no continuos y aquellos obtenidos en procesos continuos.

Esta ecuación de remoción de impurezas aplica en el rango de concentración de hidrógeno de 0.02-0.5 ml  $H_2/100g$  Al. Para los alcalinos el modelo teórico considera dos casos: 1) Altos contenidos: La remoción de alcalinos es completa y la cinética de remoción presenta un comportamiento lineal y, 2) Bajos contenidos: La reacción química entre la especie alcalina y el gas reactivo es limitada por cuestiones termodinámicas y, por lo tanto, la cinética de remoción es de primer orden.

En la última parte del artículo los autores reportan algunos valores de velocidad de remoción de hidrógeno y concentración asintótica. Provenientes de usar resultados experimentales usando el proceso Pechiney's-Irma, y aplicando un ajuste numérico a estos, obtienen una correlación que coincide exactamente con las mediciones experimentales; sin embargo, se reportan muy pocos puntos para el periodo de tiempo tan grande usado. Parece ser que hubo cierto manejo de los datos experimentales para obtener estas correlaciones. De igual manera ocurre con una correlación calculada usando el proceso Pechiney's-Alpur, en un reactor por lotes. Se observa una gran exactitud de los datos experimentales con la correlación calculada.

**Mathematical And Physical Modelling Of Melt Treatment Processes, J.F Grandfield, D.W Irwin, S Brumale and C.J Simensen, Comalco Treatment Processes, Centre for Industrial Research, Oslo Norway, Ligth Metals, 1990, pp 737-740.**

La finalidad de las investigaciones realizadas en este artículo es contribuir para un mayor uso del modelado físico y matemático en el mejoramiento del diseño del proceso, optimización de parámetros e incrementar las eficiencias de desgasificado para productos fundidos de aluminio. Este artículo detalla los procesos de desgasificado por purgado de gas y filtración de impurezas mediante el modelado físico y matemático.

Para la remoción de hidrógeno disuelto en aluminio líquido los autores se basan en los estudios realizados por Engh y Pedersen <sup>(12)</sup>, donde se demuestra que la remoción de hidrógeno esta normalmente controlada por la difusión de hidrógeno a través de la capa limite entre la burbuja de gas de remoción y el aluminio líquido.

A niveles usuales de hidrógeno presente en fundiciones comerciales, el tamaño de burbuja y por consecuencia, el área superficial de contacto son factores muy importantes en el control de la tasa de remoción.

En este artículo se busca hacer una contribución en el funcionamiento de varios diseños de rotor y sus condiciones de operación, usando el modelado físico para este propósito. Se usa agua ya que es un fluido que permite una excelente visualización, además, las viscosidades cinemáticas del agua y aluminio son muy parecidas, de tal forma que el número de Reynolds para sistemas del mismo tamaño de agua y aluminio son similares. Sin embargo, la gran diferencia en la tensión superficial de ambos fluidos debe ser considerada.

Una mayor tensión superficial del aluminio fundido limita la fragmentación de las burbujas de gas en la salida de la boquilla; junto con la expansión térmica de los gases inyectados en el aluminio líquido, producirá tamaños de burbuja grandes en comparación con las producidas en agua. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con los resultados reportados en este artículo.

El modelado físico en agua a escala real realizado en este artículo, se enfoca en el desarrollo y mejoramiento de varios rotores. Se compararon cuatro diseños de rotor. Las eficiencias de desgasificado fueron establecidas por purgado con nitrógeno a condiciones controladas de velocidad de rotación y flujos de gas. La efectividad de cada rotor se realizó mediante la medición de la cantidad removida de oxígeno disuelto en el agua. La relación entre el flujo de nitrógeno inyectado al agua y el flujo de argón para aluminio fundido, la obtienen mediante el número de Froude modificado.

Los autores consideran no solo la remoción de oxígeno, sino también la absorción simultánea de este en la superficie del reactor. Para lo cual establecen la siguiente relación para la eficiencia de remoción (S):

$$S = \frac{(k \cdot A) - (k_s \cdot A_s)}{V}$$

donde:  $k$  es el coeficiente de transferencia de masa durante el purgado,  $A$  es la superficie total de las burbujas,  $k_s$  es el coeficiente de transferencia de masa en la superficie del baño,  $A_s$  es el área superficial del reactor Bach y  $V$  es el volumen del reactor Bach.

Esta ecuación engloba tanto la cantidad de oxígeno removido en el seno del agua por las burbujas de nitrógeno puro, como la recontaminación del agua en la superficie del reactor Bach, por la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera.

Obtuvieron como resultados que las tasas de desgasificado se ven afectadas principalmente por la velocidad de rotación y del flujo de gas. Al operar con flujos de gas excesivamente altos (o velocidades de rotación muy bajas) se obtienen valores pobres de desgasificado; y para velocidades de rotor excesivamente altas se obtienen resultados poco satisfactorios, debido a la formación de vórtice y turbulencia en la superficie del baño. La velocidad ideal del rotor es la máxima admisible para evitar una turbulencia excesiva en la superficie.

Como implicaciones de estos resultados se observa que la relación entre  $S$  y los parámetros de operación (flujo de gas y velocidad de rotación), pueden indicar las implicaciones del tamaño de burbuja y su dispersión, en cambios de condiciones de operación. Asimismo, un incremento en la velocidad de rotación da un incremento proporcional en el área de contacto gas-líquido sin incrementar el consumo de gas y un incremento en el flujo de gas produce un área de contacto reducida por unidad de volumen del gas consumido y consecuentemente el gas no es usado en forma eficiente.

Debido a las diferentes condiciones de operación manejadas, no realizaron la comparación directa entre los rotores empleados, lo cual habría sido bastante interesante, ya que podría proporcionar información sobre la influencia del diseño del rotor en el proceso de desgasificado y su posible aplicación en el diseño de reactores de tratamiento, número de rotores a emplear y condiciones de operación.

**Gas Fluxing Operation In Aluminium Melt Refining Laboratory And Plant Investigations, M. Nilmani and P.K Thay, Laboratory for Extractive Research, Department of Chemical Engineering, The University of Melbourne – Australia, Ligth Metals 1990, pp 747-754.**

Hay una necesidad general de la industria de la fundición por los procesos usados en los hornos de retención para mejorar la limpieza del aluminio fundido, de ahí el interés de los autores por realizar un estudio acerca del fenómeno de inyección de gas en la refinación del aluminio para mejorar la eficiencia del tratamiento de este metal. Para lo cual desarrollaron una serie de ecuaciones en base a una teoría general para la remoción de sodio.

El cambio total de la concentración de sodio en el baño es igual a la cantidad removida por las burbujas de gas inyectado, más la cantidad evaporada en la superficie del baño. Por medio de este balance de masa desarrollan dos ecuaciones para la remoción del sodio, una para el empleo de un gas inerte y la otra para el uso de un gas reactivo. De estas ecuaciones dedujeron que para obtener una mayor eficiencia es necesario incrementar el área superficial, por medio de la generación de burbujas de menor tamaño e incrementando el flujo de gas, lo cual es complicado por la geometría del horno de reverbero, quedando solo la posibilidad de variar el diseño de la lanza.

También presentan una ecuación para el coeficiente de transferencia de masa en la superficie del fundido ( $k_s$ ), como una función de la velocidad de ascenso y del área superficial del baño ( $A_s$ ). Sin embargo, no explican de donde obtienen los valores de velocidad de ascenso que reportan y usan en el modelado matemático, dejando duda sobre la veracidad de dichos valores.

Las mediciones experimentales las realizaron en modelo físico, en planta piloto y en planta (horno de reverbero y crisol de transferencia), usando tres tipos de lanzas: lanza plana, difusor y lanza de tapón helicoidal. Los resultados obtenidos demuestran que la lanza helicoidal reduce la concentración de sodio en el aluminio fundido a valores menores que los obtenidos con la lanza plana y el difusor en un tiempo más corto. La lanza helicoidal produce burbujas mucho más pequeñas que las generadas por la lanza plana y similares al dispersor, sin embargo, las burbujas generadas por la lanza helicoidal presentan cierta dispersión radial en el seno del metal, que los otros dos medios de inyección no provocan y, por consecuencia un tiempo de

residencia más grande. Por todo esto, la lanza helicoidal tiene una eficiencia de desgasificado 21% mayor que la lanza plana y 11% mayor que la lanza con difusor.

Se debe recalcar que en la tabla de datos experimentales usados en este trabajo hay varios errores. En el modelo físico en agua reportan que usaron el mismo flujo de gas para comparar las tres lanzas usadas, lo cual es incorrecto, ya que es necesario de un mayor flujo en la lanza helicoidal y con difusor que en la lanza plana, debido a la restricción en la salida del gas. Carece de escalamiento entre las dimensiones de cada uno de los reactores usados y las condiciones de operación empleadas. También presentan un estimado del efecto de la superficie del baño por medio de  $K_s A_s$ , conservando la duda de la ecuación para calcular el coeficiente de transferencia de masa en la superficie del fundido ( $K_s$ ) en función de la velocidad de ascenso del gas.

**A new in-line aluminium treatment system using non-toxic gases and a gas-permeable vessel bottom, D. Saha, J.S Becker and L. Gluns, The minerals, metals and materials society, 1989, pp 855-877.**

El objetivo de los autores fue desarrollar nuevos sistemas para el tratamiento de aluminio fundido en procesos continuos, enfocados en reducir costos, que sean fáciles de operar y compatibles con el medio ambiente. Este estudio puede usarse para la remoción de hidrógeno disuelto en aluminio fundido y para promover la flotación de inclusiones por medio de la inyección de gas con una propela rotatoria. Los autores se basan en el trabajo realizado por Engh y Sigworth, para realizar su estudio en la remoción de hidrógeno por medio de una propela rotatoria y con un tapón poroso en el fondo de un horno continuo de tratamiento (SIGMA).

Reportan una ecuación para calcular la cantidad de gas que debe ser inyectado para remover cierta cantidad de hidrógeno del aluminio líquido; sin embargo, no mencionan como la obtuvieron.

Este artículo es una recopilación de diferentes correlaciones de variables importantes que intervienen en el proceso de desgasificado de aluminio y, su aplicación para el diseño de la unidad SIGMA. El interés primordial por este artículo son dos de estas correlaciones, la primera es: Coeficiente empírico de transferencia de masa para la remoción de hidrógeno ( $K_1$ ):

$$k_1 = 0.0128 \sqrt{\frac{D_H \cdot u}{d_b}}$$

donde:  $D_H$  es la difusividad del hidrógeno en aluminio,  $d_b$  es el diámetro de la burbuja y  $u$  es la velocidad de ascenso de las burbujas. La segunda correlación de interés es precisamente para esta última variable.

Velocidad de ascenso de las burbujas:

$$u = 1.02 \cdot \sqrt{\frac{9.81 \cdot d_b}{2}}$$

Otras correlaciones interesantes reportadas son: número de burbujas formadas, superficie total de las burbujas, diámetro de las burbujas, número de poros formados. Este sistema SIGMA de tratamiento se aplica principalmente en procesos continuos de tratamiento, pero se presenta como una alternativa interesante para ser adaptada en hornos batch, usando una propela rotatoria como medio de inyección del gas.

**Chemical and kinetics factors related to hydrogen removal from aluminum, G.K Sigworth and T.A Engh, Metallurgical Transactions, ASM and The Metallurgical Society of AIME, September 1982, pp 442-460.**

En el campo de la investigación en la remoción de impurezas no deseables en aluminio fundido, uno de los investigadores más reconocidos es T.A Engh. En este artículo se consideran los factores químicos y cinéticos del uso de gases para la remoción de hidrógeno disuelto en aluminio fundido. Inicialmente realizan un estudio termodinámico de la reacción de disolución de hidrógeno en aluminio, con el objetivo de obtener la expresión que defina la cantidad de hidrógeno disuelto en el baño, al equilibrio. Para esto, se basa en la teoría de soluciones diluidas reales.

A continuación, describen la cinética de remoción de hidrógeno como una serie de etapas y, con la ayuda de información experimental sugieren que el transporte difusivo a través de la capa límite entre metal-gas de remoción, es la etapa que controla el proceso. Partiendo de aquí, presenta un análisis matemático de la remoción de hidrógeno, usando un volumen de control para describir como actúa el gas de remoción en un reactor no continuo (batch) y formula el siguiente balance de masa en la superficie de la burbuja:

$$\frac{k \cdot \rho \cdot ([pctH] - [pctH]_{eq}) \cdot \Delta A}{100 \cdot m_H} = 2 \cdot G \cdot \Delta \left( \frac{P_{H_2}}{P_{inerte}} \right)$$

donde:  $k$  es el coeficiente de transferencia de masa empírico,  $\rho$  es la densidad del aluminio líquido,  $([pctH] - [pctH]_{eq})$  es la fuerza motriz para que se lleve a cabo la difusión del hidrógeno,  $A$  es el área de contacto de las burbujas en el fundido,  $m_H$  es el peso molecular del hidrógeno,  $G$  es el flujo másico de gas de remoción,  $P_{H_2}$  es la presión del hidrógeno y  $P_{inerte}$  es la presión del gas inerte.

Esta ecuación representa que los moles de hidrógeno transportados a través de la capa límite hacia la superficie de la burbuja en el volumen de control, es igual al incremento en la concentración de hidrógeno en las burbujas del gas de remoción. Enseguida, con el uso de la definición de la concentración al equilibrio de hidrógeno en la superficie de la burbuja  $[pctH]_{eq}$  y, suposiciones como que la superficie de la burbuja de gas de remoción no cambia durante su ascenso y que la presión total en la burbuja de gas de purgado es constante, obtienen y definen la variable  $J$ ; que es un grupo adimensional importante directamente relacionado con la composición del gas a la salida.

Después realizan un nuevo balance de masa, el cual cuantifica la cantidad de hidrógeno removido del baño por el gas de remoción, dado por la ecuación siguiente:

$$\frac{-M}{100 \cdot m_H} \cdot \frac{d[pctH]}{dt} = 2 \cdot G \cdot \left( \frac{P_{H_2}^o}{P_{inerte}} \right)$$

Donde:  $M$  es la cantidad de aluminio tratado,  $P_{H_2}^o$  es la presión de hidrógeno en la superficie del fundido.

Para resolver esta ecuación usan a  $J$  y definen la variable  $Z$ , la cual representa el cociente entre la presión parcial de hidrógeno a la salida del fundido y la presión parcial de hidrógeno al equilibrio. Una gran contribución que realizan los autores al respecto de la problemática del desgasificado por purgado con gases, es que consideran que la concentración de hidrógeno en la burbuja va cambiando conforme la burbuja asciende en el baño hacia la superficie. Otras investigaciones realizadas al respecto consideran que esta presión parcial de hidrógeno es constante, lo cual es poco realista. Con el uso de los balances de masa planteados y las variables  $J$ ,  $Z$ ; definen un cociente denominado área de contacto adimensional  $\phi/[pctH]$ , que relaciona la capacidad del hidrógeno a difundir hacia las burbujas durante su ascenso con la capacidad del gas de remoción a adsorber el hidrógeno del baño. La evaluación de este cociente proporciona la información necesaria para saber si el proceso de remoción es controlado termodinámicamente o cinéticamente.

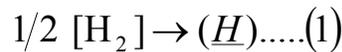
Finalmente obtienen una ecuación general que aplica para cualquier valor del cociente  $\phi/[pctH]$ , y que es válida para el control difusivo en capa límite entre metal-burbuja y también para un posible control químico que se presenta en tiempos grandes de tratamiento cuando el contenido de hidrógeno decae considerablemente.

En base al trabajo realizado en este artículo, se puede determinar la influencia que tienen ciertas variables de proceso en la remoción de hidrógeno de aluminio líquido. El planteamiento y desarrollo del modelo matemático riguroso y fundamental con alta calidad y realismo, basado en principios termodinámicos y cinéticos que gobiernan la remoción de hidrógeno de baños de aluminio líquido se presenta detalladamente en el siguiente capítulo.

### 3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA REMOCIÓN DE HIDRÓGENO EN ALEACIONES DE ALUMINIO

#### 3.1 ASPECTOS TERMODINÁMICOS.

El proceso de disolución de un gas di-atómico como el hidrógeno en un metal líquido, está descrito por el siguiente equilibrio:



La constante de equilibrio termodinámico ( $Keq$ ) para la reacción anterior, está definida como:

$$Keq = \frac{a_{H}^h}{\sqrt{P_{H_2}}} \dots (2)$$

Donde:  $a_{H}^h$  es la actividad henriana en por ciento en peso del hidrógeno disuelto en equilibrio, y está definida como:

$$a_{H}^h = f_H \cdot [pctH] \dots (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en (2), obtenemos una nueva expresión para definir la constante de equilibrio para la disolución de hidrógeno, como sigue:

$$Keq = \frac{f_H \cdot [pctH]_{eq}}{\sqrt{P_{H_2}}} \dots (4)$$

Al equilibrio, la concentración de hidrógeno disuelto en el metal líquido está dado por la siguiente expresión:

$$[pctH]_{eq} = \frac{Keq \cdot \sqrt{P_{H_2}}}{f_H} \dots (5)$$

En soluciones binarias Al-H, las cuales contienen solo algunas partes por millón de hidrógeno como impureza, el coeficiente de actividad henriano del hidrógeno,  $f_H$ , se considera unitario. Entonces la ecuación (5) puede describirse de la forma:

$$[pctH] = K_s \cdot \sqrt{P_{H_2}} \dots (6)$$

La ecuación (6) es conocida como Ley de Sievert; la cual describe la variación en el equilibrio del contenido de hidrógeno disuelto como una función de la raíz cuadrada de la presión parcial de hidrógeno sobre el metal líquido.  $K_s$  es llamada la constante de Sievert, y representa la solubilidad del hidrógeno a presión atmosférica.

Estudios realizados por Opie y Grant <sup>(14)</sup>, con respecto a la solubilidad de hidrógeno en aluminio puro, a una atmósfera de presión en 100 g de Al, han determinado la siguiente expresión:

$$\log S_H = \frac{-2550}{T} + 2.62 \dots (7)$$

Donde, la solubilidad de hidrógeno en aluminio líquido,  $S_H$ , está dada en mililitros de hidrógeno por 100 gramos de aluminio, mientras que la temperatura,  $T$ , está dada en grados Kelvin.

La Figura 1.7 muestra que la solubilidad de hidrógeno presenta tres distintas características:

- 1) Una fuerte dependencia de la temperatura en estado líquido.
- 2) Una baja solubilidad en estado sólido.
- 3) Un gran cambio en la solubilidad en el punto de fusión.

Podemos observar en la Figura 1.8 que la presencia de elementos aleantes en una aleación de aluminio modifica la solubilidad del hidrógeno. Algunos elementos disminuyen la solubilidad del hidrógeno en aluminio; y algunos otros la incrementan. La presencia de más de un elemento aleante cambia la solubilidad del hidrógeno, esto ocurre en cualquier aleación comercial, como la A356. Por esta razón, es necesario el uso de coeficientes de iteración, para conocer las interacciones del hidrógeno con el mismo y con los otros solutos.

En las soluciones diluidas reales el soluto muestra frecuentemente una desviación con respecto a la idealidad henriana. Para tomar en cuenta estas desviaciones al momento de describir el coeficiente de actividad del soluto, se emplean estos factores correctivos determinados experimentalmente, denominados parámetros de interacción.

El concepto de parámetro de interacción corresponde a la aplicación de una serie de Taylor truncada, para predecir que valor toma el coeficiente de actividad del soluto en presencia de otros solutos y cuando el mismo está fuera del rango de validez de la ley de Henry, es decir, cuando las soluciones no son infinitamente diluidas. La expansión se expresa de la siguiente manera:

$$F(x + \Delta x) = F(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta x^n}{n!} \cdot F^n(x)_x$$

Generalmente esta serie es truncada en el término de segundo orden:

$$F(x + \Delta x) = F(x) + \frac{\Delta x}{1!} \cdot F'(x)_x + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot F''(x)_x$$

$$\log(\hat{f}_i) = \log(f_i)_{\rightarrow 0} + e^j_i \cdot (\%i) + r^j_i \cdot (\%i)$$

Donde:

- El parámetro de orden cero, corresponde a las interacciones entre el soluto y el solvente.
- El parámetro de orden uno ( $e^i_H$ ), corresponde a las interacciones que el soluto comienza a tener entre si mismo. Corrección lineal.
- El parámetro de orden dos ( $r^i_H$ ), corresponde a las interacciones que el soluto comienza a tener entre si mismo. Corrección por curvatura.

Para la reacción de disolución de hidrógeno en la aleación A356, tenemos los siguientes parámetros de interacción encontrados en la literatura <sup>(10)</sup>:

Composición de la Aleación A-356 (% peso)		Parámetros de Iteración (1er Orden)	
Al	92.7	$e^H_H$	0
Si	7.0	$e^{Si}_H$	0.030
Mg	0.3	$e^{Mg}_H$	-0.01

Con estos valores podemos conocer el valor del coeficiente de actividad henriano mediante la siguiente expresión:

$$\log(f_H) = e^H_H \cdot [pctH] + e^{Si}_H \cdot [pctSi] + e^{Mg}_H \cdot [pctMg] \dots (8)$$

### 3.2 FACTORES CINÉTICOS.

El hidrógeno es removido del aluminio líquido cuando se inyecta un gas inerte en el fundido, por medio de una serie de mecanismos de transporte, los cuales son:

- 1) Transporte del hidrógeno atómico a través del fundido hacia la vecindad de la burbuja de gas inerte (el mecanismo de transporte es predominantemente convectivo en presencia de un rotor o propela rotatoria que agita al baño).
- 2) Transporte difusivo a través de la capa límite metal-gas de remoción, hacia la superficie de la burbuja.
- 3) Adsorción de los átomos de H en la superficie de la burbuja.
- 4) Reacción entre dos átomos de hidrógeno, para la formación de una molécula de hidrógeno gaseoso.
- 5) Transporte difusivo del hidrógeno molecular hacia el seno de la burbuja.
- 6) Remoción del hidrógeno en la superficie del fundido o en las paredes del refractario.

En el análisis matemático para la remoción de hidrógeno se toman las siguientes suposiciones:

- a) El transporte difusivo a través de la capa límite metal-gas de remoción es el mecanismo controlante.
- b) El baño líquido está bien agitado. Por lo tanto, la concentración de hidrógeno es uniforme en todo el fundido.
- c) La concentración es uniforme a través de la burbuja de gas.
- d) La presión parcial de hidrógeno en las burbujas es muy pequeña, comparada con la presión del gas inerte.

$$P_{H_2} + P_{inerte} = P_{Total} \dots (9)$$

$$P_{H_2} \rightarrow 0 \dots \therefore P_{inerte} \cong P_{Total} \dots (10)$$

- e) El área superficial de la burbuja de gas de remoción, no cambia con su posición en el baño. Esto equivale a asumir que la presión total en la burbuja de gas es constante.

$$\Delta A \equiv 0 \dots \therefore A \equiv cte \dots (11)$$

### 3.2.1 BALANCE DE MASA PARA LA REMOCIÓN DE HIDRÓGENO (EN LA SUPERFICIE DE LA BURBUJA DE GAS DE REMOCIÓN)

Se considera el cambio en la composición del gas de remoción, como el cambio en la presión parcial del hidrógeno en la burbuja de gas, durante su ascenso en el baño líquido. Para lo cual, es necesario el establecer un volumen de control para el desarrollo del balance másico para la remoción de hidrógeno. Un diagrama esquemático de dicho volumen de control se muestra en la Figura 3.1 <sup>(15)</sup>.

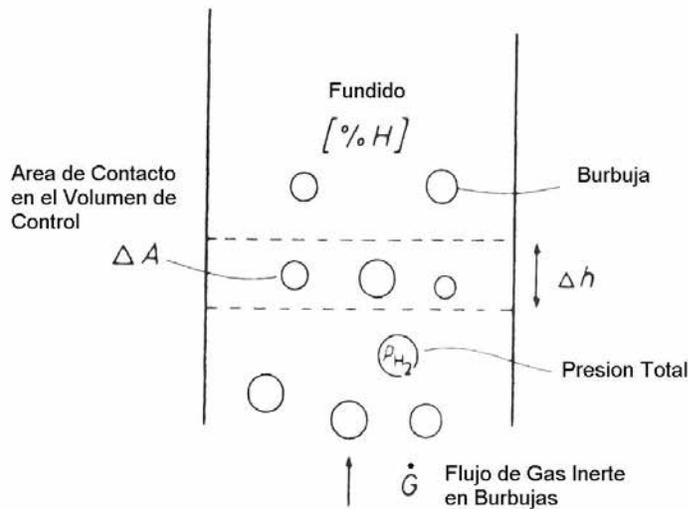


Figura 3.1 Volumen de Control <sup>(15)</sup>.

El siguiente balance de masa establece que los moles de hidrógeno transportados por segundo hacia las burbujas en el volumen de control, a través de la capa límite cercana a la burbuja, es igual al incremento en la concentración de hidrógeno en las burbujas de gas de remoción.

$$\frac{k \cdot \rho \cdot ([pctH] - [pctH]_{eq}) \cdot \Delta A}{100 \cdot m_H} = 2 \cdot G \cdot \Delta \left( \frac{P_{H_2}}{P_{inerte}} \right) \dots (12)$$

Para que el transporte difusivo a través de la capa límite se presente, es necesaria una fuerza motriz para llevar a cabo este transporte másico, y esta es la diferencia de potenciales químicos o concentraciones, expresada por:

$$[pctH] - [pctH]_{eq} \dots (13)$$

Donde:  $[pctH]_{eq}$  es la concentración al equilibrio de hidrógeno en la superficie de la burbuja.

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (12), obtenemos:

$$\Delta \left( \frac{P_{H_2}}{P_{inerte}} \right) = \frac{k \cdot \rho \cdot ([pctH]) \cdot \Delta A}{200 \cdot m_H \cdot G} - \frac{k \cdot \rho \cdot \sqrt{P_{H_2}} \cdot Keq \cdot \Delta A}{200 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H} \dots (14)$$

Considerando que el área superficial de la burbuja de gas no cambia durante su ascenso y que la presión total en la burbuja de gas es constante, es decir,  $P_{inerte} = \text{constante}$  y factorizando el término  $k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot \Delta A$  obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{\Delta P_{H_2}}{P_{inerte}} = \frac{k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot \Delta A \left( 1 - \frac{\sqrt{P_{H_2}} \cdot Keq}{f_H \cdot [pctH]} \right)}{200 \cdot m_H \cdot G} \dots (15)$$

Rescribiendo la ecuación (15):

$$\frac{k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot P_{inerte} \cdot A}{200 \cdot m_H \cdot G} = J = \frac{dP_{H_2}}{\left( 1 - \frac{\sqrt{P_{H_2}} \cdot Keq}{f_H \cdot [pctH]} \right)} \dots (16)$$

Donde:  $J$  es un grupo adimensional importante directamente relacionado con la composición del gas a la salida.

A continuación, integramos el lado derecho de la ecuación (16) para cuantificar el cambio en la concentración de hidrógeno en la burbuja, desde que esta entra al baño líquido hasta que sale del mismo.

$$J = \int_0^{P_{H_2}^o} \frac{dP_{H_2}}{\left(1 - \frac{\sqrt{P_{H_2}} \cdot Keq}{f_H \cdot [pctH]}\right)} \dots (17)$$

Los límites de integración son:

- Se asume que la burbuja de gas al entrar al fundido no contiene hidrógeno ( $P_{H_2}=0$ . límite inferior).
- La concentración de hidrógeno en el gas de purgado a la salida del baño, es  $P_{H_2}^o$ .

Obteniendo:

$$J = -\frac{2 \cdot f_H \cdot [pctH] \cdot \sqrt{P_{H_2}^o}}{Keq} - \frac{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]^2}{Keq^2} \cdot \ln \left(1 - \frac{\sqrt{P_{H_2}} \cdot Keq}{f_H \cdot [pctH]}\right) \dots (18)$$

Con esta ecuación podemos determinar la concentración de hidrogeno en las burbujas a la salida del baño líquido.

### 3.2.2 BALANCE DE MASA PARA EL HIDRÓGENO A LA ENTRADA DEL REACTOR BATCH

El balance anterior esta hecho sobre la superficie de la burbuja y cuantifica el hidrógeno que es removido del baño de aluminio líquido y es absorbido por las burbujas de gas inerte. Ahora, para cuantificar la cantidad de hidrógeno removido del baño por el gas de remoción, se requiere plantear el siguiente balance de masa, el cual relaciona al hidrógeno removido del metal líquido, que es igual al hidrógeno absorbido por las burbujas de gas.

$$\frac{-M}{100 \cdot m_H} \cdot \frac{d[pctH]}{dt} = 2 \cdot G \cdot \left(\frac{P_{H_2}^o}{P_{inerte}}\right) \dots (19)$$

Para resolver esta ecuación, es necesario introducir la variable "Z" (eficiencia de desgasificado), la cual relaciona la presión parcial de hidrógeno a la salida del gas de remoción, con la presión parcial de hidrógeno al equilibrio.

$$Z = \frac{\sqrt{P_{H_2}^o} \cdot Keq}{f_H [pctH]} \dots (20)$$

De la ecuación (4) sabemos que la presión de hidrógeno al equilibrio está definida como:

$$\sqrt{P_{H_2}} = \frac{f_H [pctH]}{Keq} \dots (21)$$

Sustituyendo la ecuación (21) en (20), obtenemos una nueva definición para Z, quedando definida como:

$$Z = \sqrt{\frac{P_{H_2}^o}{P_{H_2}}} \dots (22)$$

$$0 \leq Z \leq 1$$

- Al  $t=0$ , cuando la burbuja entra al metal líquido, Z es igual a cero.
- Al  $t=t$ , si la burbuja alcanza la saturación, Z alcanza el valor de uno como valor límite.

Retomando la ecuación (20), la presión parcial de hidrógeno a la salida del fundido está definida como:

$$P_{H_2}^o = \left( \frac{Z \cdot f_H \cdot [pctH]}{Keq} \right)^2 \dots (23)$$

Sustituyendo la ecuación (23) en el balance másico (19):

$$\frac{-M}{100 \cdot m_H} \cdot \frac{d[pctH]}{dt} = \frac{2 \cdot G}{P_{inerte}} \cdot \left( \frac{Z \cdot f_H \cdot [pctH]}{Keq} \right)^2 \dots (24)$$

Por otra parte, retomando la ecuación (18):

$$J = -\frac{2 \cdot f_H \cdot [pctH] \cdot \sqrt{P_{H_2}^o}}{Keq} - \frac{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]^2}{Keq^2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\sqrt{P_{H_2}^o} \cdot Keq}{f_H \cdot [pctH]} \right) \dots (18)$$

Usando la ecuación (20), rescribimos la ecuación (18) en función de Z, como sigue:

$$J = \frac{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]^2}{Keq^2} \cdot [z - \ln(1 - z)] \dots (25)$$

$$\text{ó} \quad \frac{1}{[pctH]^2} = \frac{2 \cdot f_H^2}{J \cdot Keq^2} \cdot [-z - \ln(1 - z)] \dots (26)$$

Esto implica a  $Z$  como una función de la concentración de hidrógeno y,  $J$  como un grupo adimensional importante, que está directamente relacionado con la composición del gas a la salida.

Rescribiendo la ecuación (25), se obtiene el cociente ( $\phi/[pctH]$ ), denominado concentración adimensional de hidrógeno. Esta expresión relaciona directamente la composición del gas que escapa y la eficiencia del gas usado en la inyección para purgar el baño.

$$\frac{J \cdot Keq^2}{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]^2} = [z - \ln(1 - z)] = \frac{\phi}{[pctH]} \dots (27)$$

Retomando la parte izquierda de la ecuación (16), y sustituyendo en la definición de la concentración de hidrógeno adimensional (27), obtenemos:

$$\frac{J \cdot Keq^2}{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]^2} = \frac{k \cdot \rho \cdot A \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{400 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2} \cdot \frac{1}{[pctH]} = \frac{\phi}{[pctH]} \dots (28)$$

- Cuando la relación  $\phi/[pctH]$  es pequeña, entonces  $Z$  también lo es. Esto quiere decir, que el gas está alejado del equilibrio, por lo tanto, la difusión de hidrógeno a través de la capa límite es el mecanismo controlante de la deshidrogenación.
- Cuando la relación  $\phi/[pctH]$  es grande, entonces  $Z$  se aproxima a 1, es decir, se alcanza el equilibrio, quedando saturada la burbuja de gas, por lo que en este caso el control es químico o termodinámico.

$$\phi = \frac{k \cdot \rho \cdot A \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{400 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2} \dots (29)$$

Es necesario obtener una solución general, que sea válida para cualquier valor de tiempo, incluso valores muy grandes, donde la concentración de hidrógeno en el metal líquido disminuye notablemente y el control es químico.

Con el uso del parámetro numérico  $B$  definido como:

$$B = \frac{M \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{200 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2} \dots (30)$$

Rescribiendo la ecuación (24) en términos del parámetro  $B$ , obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{M \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{200 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2} \cdot \frac{1}{Z^2} \cdot d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = dt \dots (31)$$

Por lo tanto, el balance de masa de hidrógeno a la entrada del reactor, queda como:

$$\frac{B}{Z^2} \cdot d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = dt \dots (32)$$

Por otra parte, sustituyendo el lado izquierdo de la ecuación (16) en la ecuación (26), obtenemos:

$$\frac{1}{[pctH]^2} = \frac{2 \cdot f_H^2}{\left(\frac{k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot P_{inerte} \cdot A}{200 \cdot m_H \cdot G}\right) \cdot Keq^2} \cdot [-z - \ln(1-z)] \dots (33)$$

Multiplicando por  $[pctH]$  la ecuación (33):

$$\frac{1}{[pctH]} = \frac{2 \cdot f_H^2 \cdot [pctH]}{\left(\frac{k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot P_{inerte} \cdot A}{200 \cdot m_H \cdot G}\right) \cdot Keq^2} \cdot [-z - \ln(1-z)] \dots (34)$$

Arreglando la ecuación (34):

$$\frac{1}{[pctH]} = \frac{400 \cdot f_H^2 \cdot m_H \cdot G \cdot [pctH]}{k \cdot \rho \cdot [pctH] \cdot P_{inerte} \cdot A \cdot Keq^2} \cdot [-z - \ln(1-z)] \dots (35)$$

Usando la ecuación (29), la ecuación (35) queda como:

$$\frac{1}{[pctH]} = \frac{1}{\varphi} \cdot [-z - \ln(1-z)] \dots (36)$$

Derivando el lado derecho de la ecuación (36), notamos en la ecuación (29) que  $\varphi$  no depende del tiempo:

$$\frac{d[-z - \ln(1-z)]}{dz} = \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) \dots (37)$$

Derivando ambos lados de la igualdad (36):

$$d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = \frac{1}{\varphi} \cdot \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) dz \dots (38)$$

Sustituyendo  $1/\phi$ , en la ecuación (38):

$$d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = \frac{400 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2}{k \cdot \rho \cdot A \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2} \cdot \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) dz \dots (39)$$

Retomando el Balance Másico de la ecuación (31):

$$\frac{M \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{200 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2} \cdot \frac{1}{Z^2} \cdot d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = dt \dots (31)$$

Combinando las ecuaciones (31) y (39), obtenemos la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{M \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}{200 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2}\right) \cdot \left(\frac{1}{Z^2}\right) \cdot \left(\frac{400 \cdot m_H \cdot G \cdot f_H^2}{k \cdot \rho \cdot A \cdot P_{inerte} \cdot Keq^2}\right) \cdot \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) dz = dt \dots (40)$$

Simplificando la ecuación (40):

$$\left(\frac{2 \cdot M}{k \cdot \rho \cdot A}\right) \cdot \left(\frac{dz}{z^2}\right) \cdot \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) = dt \dots (41)$$

A continuación, es necesario un manejo algebraico del segundo y tercer término del lado izquierdo de expresión (41), como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{dz}{z^2}\right) \cdot \left(-1 + \left(\frac{1}{1-z}\right)\right) = -\frac{dz}{z^2} + \frac{dz}{z^2(1-z)} = dz \cdot \left(\frac{1}{z^2(1-z)} - \frac{1}{z^2}\right) =$$

$$dz \cdot \left(\frac{z^2 - z^2(1-z)}{z^4(1-z)}\right) = dz \cdot \left(\frac{z^2(1 - (1-z))}{z^2(z^2(1-z))}\right) = dz \cdot \left(\frac{1 - (1-z)}{z^2(1-z)}\right) =$$

$$dz \cdot \left(\frac{z}{z^2(1-z)}\right) = dz \cdot \left(\frac{1}{z(1-z)}\right) = \frac{dz}{z(1-z)}$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{2 \cdot M}{k \cdot \rho \cdot A}\right) \cdot \left(\frac{dz}{z(1-z)}\right) = dt \dots (42)$$

Quedando definido un nuevo parámetro numérico denominado  $E$ , como:

$$E = \left( \frac{2 \cdot M}{k \cdot \rho \cdot A} \right) = \frac{B}{\varphi} \dots (43)$$

Por lo tanto, la ecuación (42) puede describirse de la siguiente forma:

$$E \cdot \left( \frac{dz}{z(1-z)} \right) = dt \dots (44)$$

Integrando la ecuación (44), para evaluar desde que la burbuja de gas de remoción entra al fundido ( $t=0$ ), hasta que sale del mismo ( $t=t$ ):

$$E \cdot \int \frac{dz}{z(1-z)} = \int_{t=0}^{t=t} dt$$

La solución de integrar el lado izquierdo de la ecuación (44), es:

$$\ln \left( \frac{z}{1-z} \right) = t / E + e_i \dots (45)$$

Donde:  $e_i$  es una constante de integración.

Despejando  $Z$  en la ecuación (45), se obtiene la ecuación siguiente:

$$z = \frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}} \dots (46)$$

Sustituyendo la ecuación (46) en la ecuación (36), se obtiene:

$$\frac{1}{[pctH]} = \frac{1}{\varphi} \cdot \left[ - \left( \frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}} \right) - \ln \left( 1 - \left( \frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}} \right) \right) \right] \dots (47)$$

Evaluando la ecuación (47) a la entrada al baño de aluminio líquido ( $t=0$ ), se obtiene la ecuación:

$$\frac{\varphi}{[pctH]_{inicial}} = \frac{-e_i}{1 + e_i} + \ln(1 + e_i) \dots (48)$$

Para evaluar el cambio en la concentración de hidrógeno con respecto del tiempo, utilizamos la ecuación (46) y la sustituimos en el Balance de Masa que representa la ecuación (32):

$$\frac{B}{\left(\frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}}\right)^2} \cdot d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = dt \dots (49)$$

Reacomodando la ecuación (49), se obtiene la ecuación (50):

$$d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}}\right)^2 dt \dots (50)$$

Para conocer el valor de la concentración final de hidrógeno al terminar el tratamiento de desgasificado, se evalúa desde que la burbuja de gas de remoción entra al baño de aluminio líquido ( $t=0$ ), hasta que dicha burbuja lo abandona ( $t=t$ ):

$$\int_{[pctH]_{inicial}}^{[pctH]_{final}} d\left(\frac{1}{[pctH]}\right) = \frac{1}{B} \int_{t=0}^{t=t} \left(\frac{e_i \cdot \exp^{(t/E)}}{1 + e_i \cdot \exp^{(t/E)}}\right)^2 dt$$

Obteniendo la ecuación general (51), que aplica para todos los valores del cociente  $\phi/[pctH]$ . Esta ecuación valida el modelo de desgasificación tanto para control difusional, como para control químico a tiempos largos de procesamiento, donde la concentración de hidrógeno es tan baja en el baño, que no hay suficiente fuerza motriz para la deshidrogenación.

$$\frac{1}{[pctH]_f} = \frac{E}{B} \left[ \frac{1}{1 + (1/e_i)} - \frac{\exp(t/E)}{\exp(t/E) + (1/e_i)} + \ln\left(\frac{1 + (e_i \cdot \exp(t/E))}{1 + e_i}\right) \right] + \frac{1}{[pctH]_i} \dots (51)$$

## 4. MÉTODO DE SOLUCIÓN

### 4.1 ANÁLISIS DEL PROCESO

Por medio del análisis matemático de la cinética de remoción de hidrógeno en aluminio líquido, obtenemos la ecuación (51) que representa una solución general para la remoción de hidrógeno en hornos no continuos (batch). Esta ecuación nos permite conocer la concentración de hidrógeno en el aluminio fundido en cualquier instante de tiempo durante el tratamiento. Para resolver esta ecuación es necesario conocer dos parámetros numéricos ( $E$  y  $B$ ), así como de la constante de integración  $e_i$ .

Para cumplir totalmente con los objetivos trazados en este trabajo, también es necesario el resolver las ecuaciones: Eficiencia del tratamiento de desgasificado (Ec. 22), Presión parcial de hidrógeno a la salida del fundido (Ec. 23) y Concentración adimensional de hidrógeno (Ec.28). Definidas todas ellas en el modelo matemático descrito en la sección anterior.

Para la solución de esta serie de ecuaciones, necesarias para un estudio detallado del proceso de desgasificado de la aleación A-356 en un horno batch por la técnica de propela rotatoria; se desarrolló un programa de cómputo en lenguaje Digital Visual Fortran. Entre la información necesaria que debe proporcionarse a dicho programa para que realice los cálculos correspondientes, se tienen:

1) Información correspondiente a propiedades físicas y químicas:

- Coeficiente henriano de actividad del hidrógeno.
- Composición de la aleación 356 (% Al, %Si y % Mg).
- Densidad de la aleación 356.
- Presión de las burbujas entrando al sistema.
- Peso atómico del hidrógeno.

2) Correlaciones analíticas o empíricas para las siguientes cantidades (Apéndice A):

- Velocidad de ascenso de las burbujas.
- Constante de equilibrio (Termodinámica).
- Coeficiente de difusión de hidrógeno en aluminio líquido.
- Flujo másico de gas de remoción.
- Área de contacto de las burbujas.
- Correlaciones empíricas del coeficiente de transferencia de masa. Uno de los objetivos de este trabajo es el comparar dos diferentes correlaciones empíricas del coeficiente de transferencia de masa, denominadas  $Cks_1$  y  $Cks_2$ . El listado de dichas correlaciones se encuentra también en el apéndice A.

3) Además, se debe alimentar al programa la siguiente información sobre las variables del proceso:

- Tamaño de las Burbujas ( $d_b$ ).
- Temperatura (T)
- Profundidad de Inmersión de la Propela (h)
- Flujo de Gas ( $Q_g$ )
- Cantidad de Metal Tratado (M)
- Concentración Inicial de Hidrógeno en el Fundido (pctHi)

Estas últimas son las variables del proceso que se analizaron en este trabajo. Para estudiar el efecto de cada una de las variables descritas, partimos de condiciones estándar típicas encontradas en la industria y que aparecen en la columna "INDUSTRIA" de la Tabla 4.1.

Para estudiar el efecto de cada variable del proceso de desgasificado sobre la cinética de desgasificación y realizar el análisis del proceso, se propuso un rango de variación de +/-15 y +/-30 % de los valores estándar, manteniendo el resto de variables fijas en sus valores de "INDUSTRIA" (columna 3 de Tabla 4.1). La temperatura fue la única variable que no se modificó en estas proporciones, ya que al disminuir el valor inicial en estos porcentajes, la aleación A356 no alcanza su temperatura de fusión. La temperatura se varió +/-50 y +/-100° C.

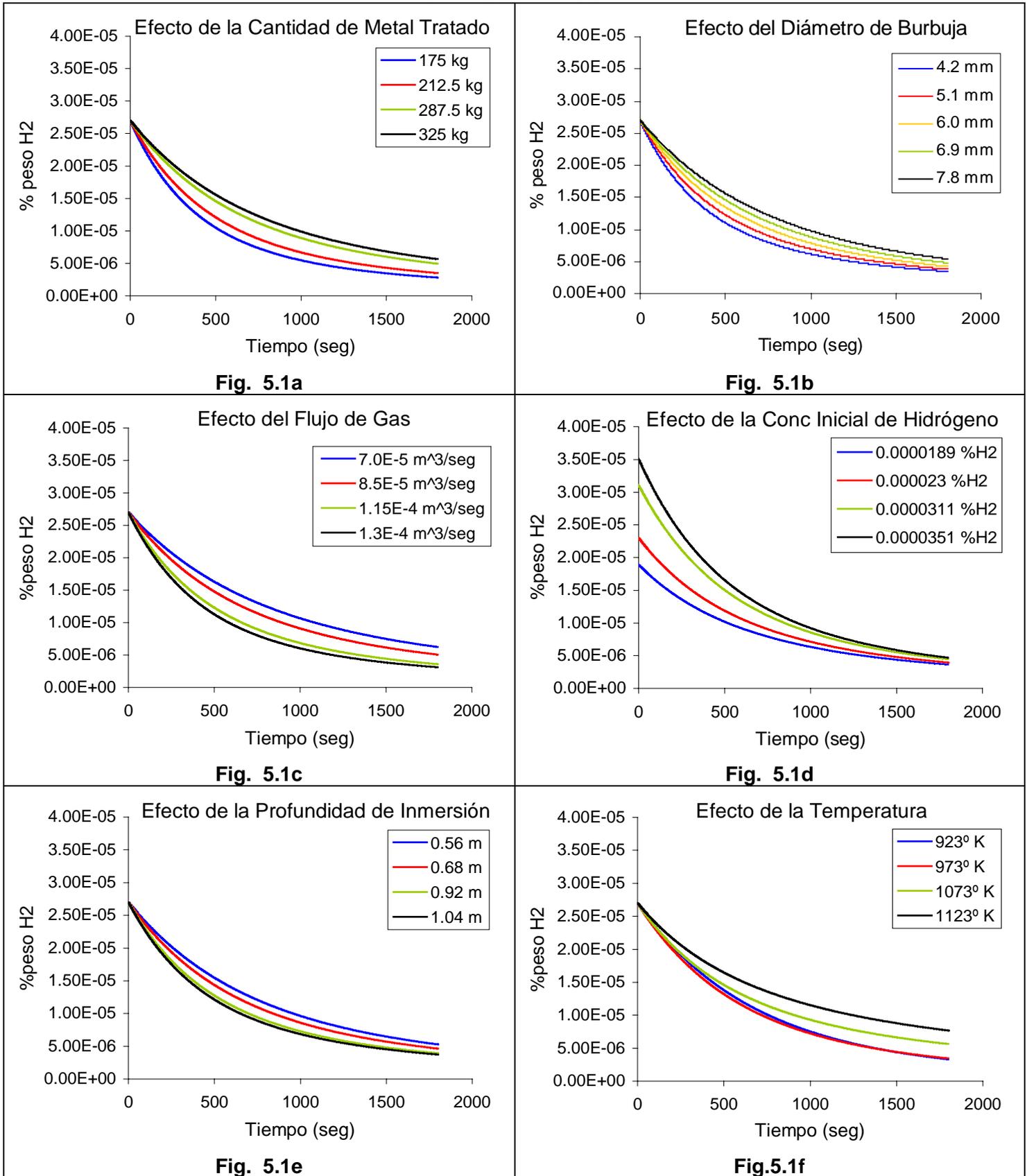
Por ejemplo, para explorar el efecto del tamaño de burbuja, se mantienen la temperatura a 1023 K, el flujo de gas a  $1 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s, la profundidad de inmersión de la flecha en el baño de 0.8m, la masa de aluminio en 250 Kg con un porcentaje de hidrógeno inicial de  $2.7 \times 10^{-5}$  % peso y se varía el diámetro de burbuja con los cinco valores reportados en la Tabla 4.1, haciendo cinco corridas computacionales distintas. El resto de los efectos de las demás variables se trata de similar manera.

<b>Tabla 4.1 Condiciones experimentales de las corridas computacionales para realizar el análisis del proceso</b>					
Variable	VALOR				
	- 30%	- 15%	INDUSTRIA	+ 15%	+30%
	1	2	3	4	5
$d_b$ (m)	4.2E-03	5.1E-03	6.0E-03	6.9E-03	7.8E-03
T (°K)	923	973	1023	1073	1123
$Q_g$ (m <sup>3</sup> /s)	7.00E-05	8.50E-05	1.00E-04	1.15E-04	1.30E-04
h (m)	0.56	0.68	0.8	0.92	1.04
M (Kg)	175	212.5	250	287.5	325
pctHi (% peso)	1.89E-05	2.30E-05	2.70E-05	3.11E-05	3.51E-05

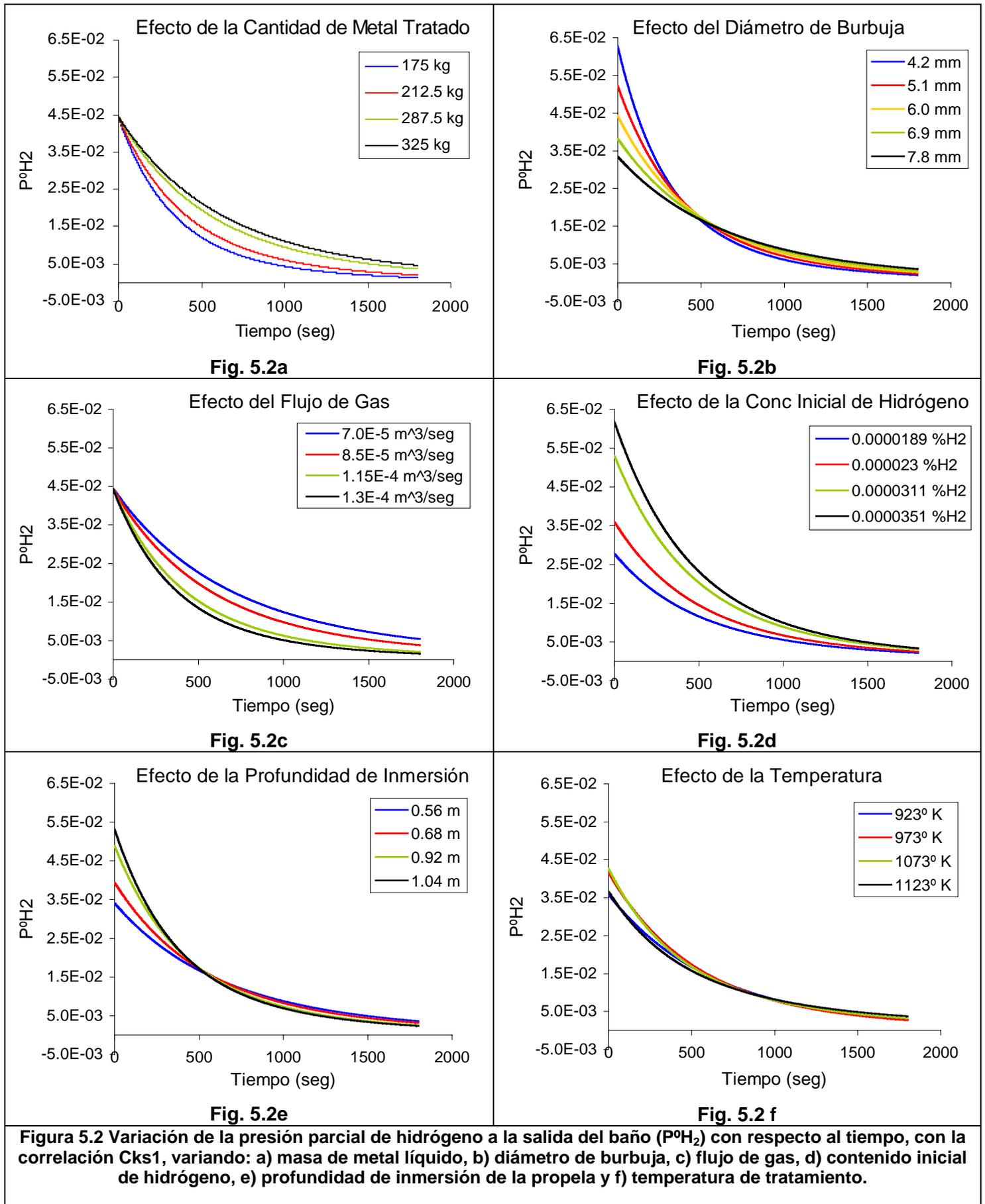
Con la asignación de las propiedades físicas y químicas de la aleación y de las condiciones de proceso, el programa es capaz de obtener la solución de las correlaciones definidas en el algoritmo de programación y con estas, la solución de los parámetros numéricos B, E y, de las ecuaciones (22, 23 y 28). Sin embargo, la ecuación (51) requiere del cálculo de la constante de integración  $e_i$ , para lo cual fue necesario el implementar en el programa de cómputo una rutina de solución por uno de los métodos numéricos más conocidos y poderosos para la búsqueda de raíces, el Método de Newton-Raphson.

Este método iterativo definido por la expresión  $f(x)=0$  se conoce como el Método de las Tangentes. Rescribiendo la ecuación (48) e igualándola a cero, definimos la función  $f(e_i) = 0$  y la derivada de dicha función con respecto a la variable de integración  $e_i$ , como  $(de_i)$ . Con la primera iteración se obtiene un valor de " $y=f(e_i)$ ", en este punto la derivada de la función describe una línea tangente a la curva de la función, con lo cual obtenemos un nuevo valor de  $e_i$  para la siguiente iteración, repitiendo este proceso tantas veces como sea necesario hasta que el valor de  $e_i$  usado en la iteración sea igual al nuevo valor obtenido de  $e_i$  (ver Apéndice C).

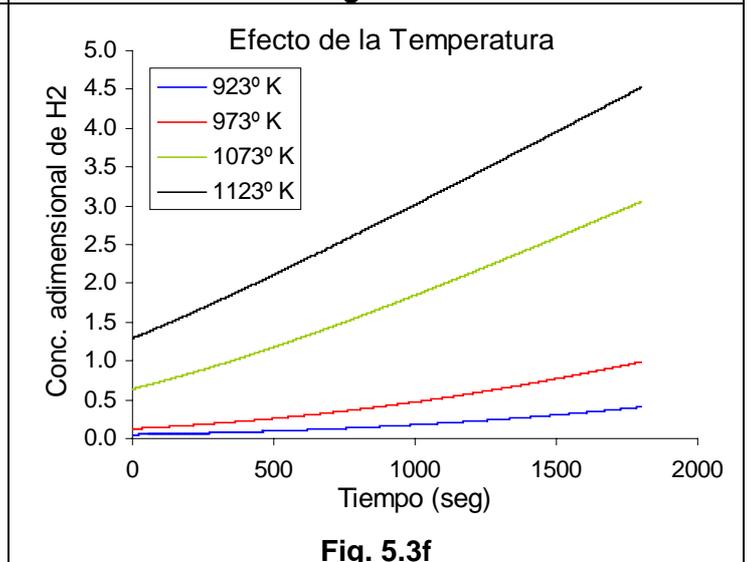
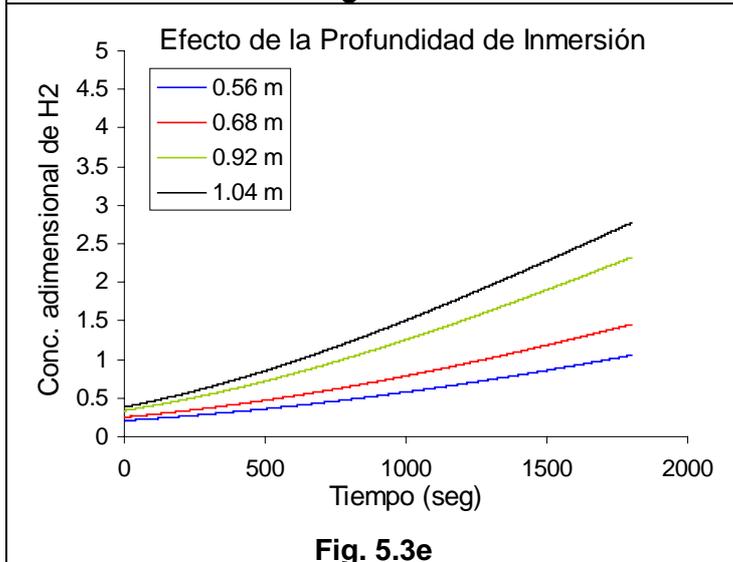
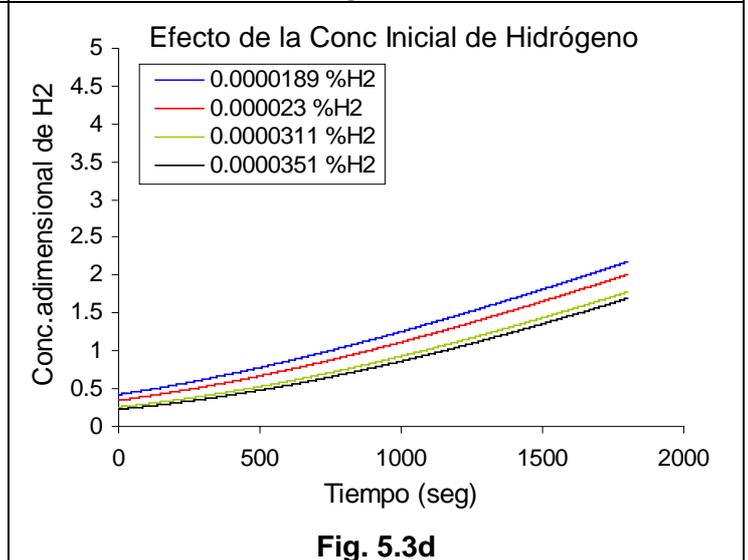
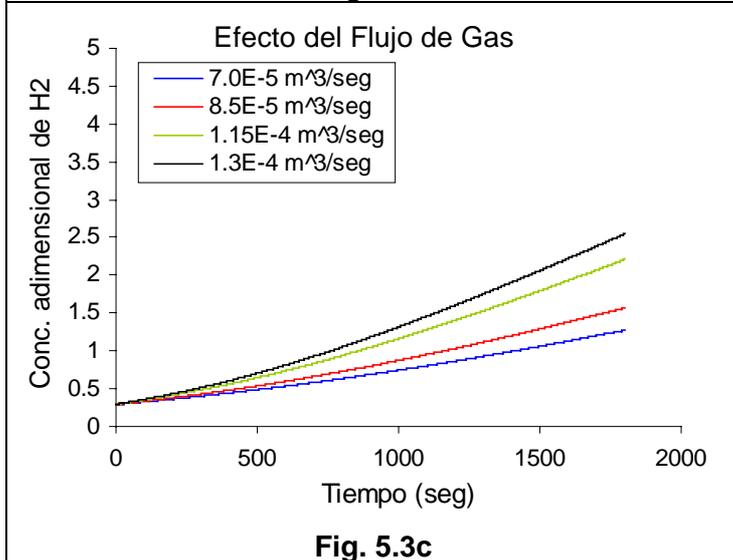
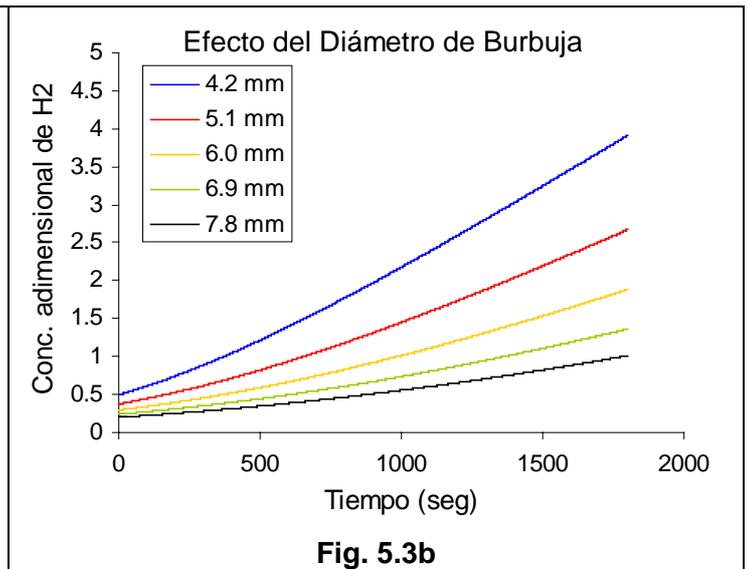
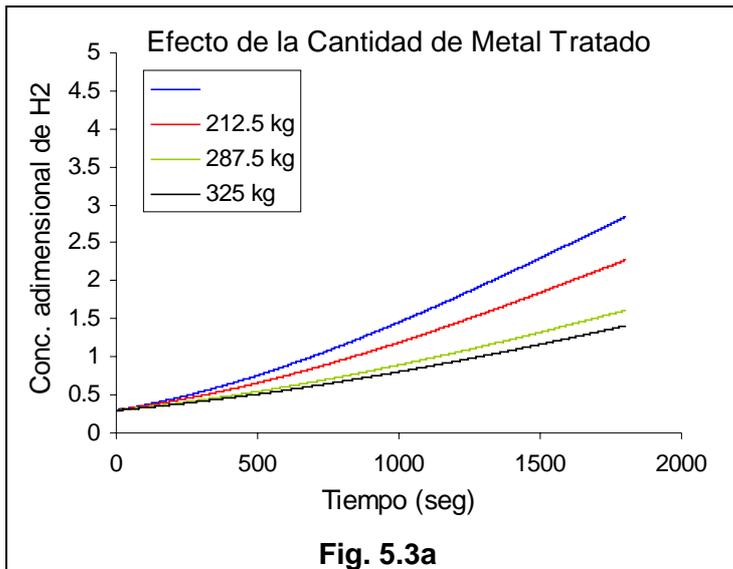
## 5. RESULTADOS



**Figura 5.1** Variación de la concentración de hidrógeno con respecto al tiempo, con la correlación Cks1, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.



**Figura 5.2** Variación de la presión parcial de hidrógeno a la salida del baño ( $P^{\circ}H_2$ ) con respecto al tiempo, con la correlación  $C_{ks1}$ , variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.



**Figura 5.3** Variación de la concentración adimensional de hidrógeno ( $\phi/[pctH]$ ) con respecto al tiempo, con la correlación  $Cks1$ , variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.

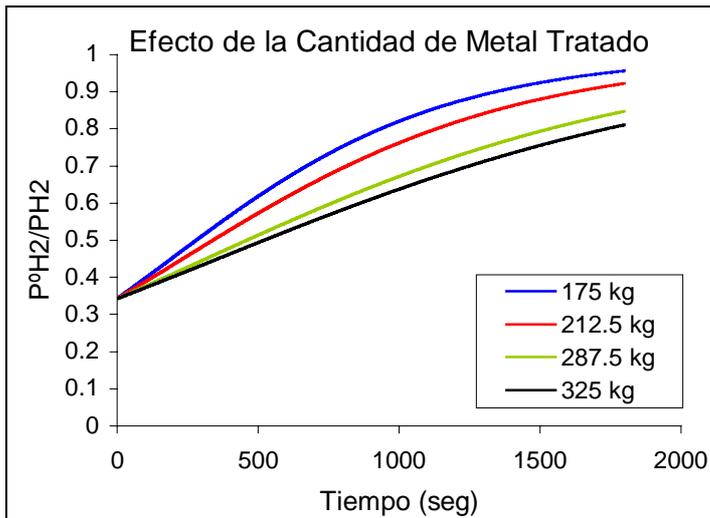


Fig. 5.4a

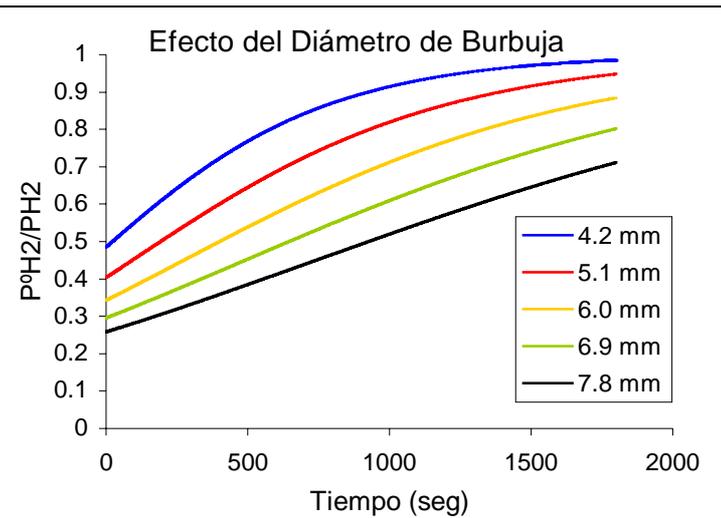


Fig. 5.4b

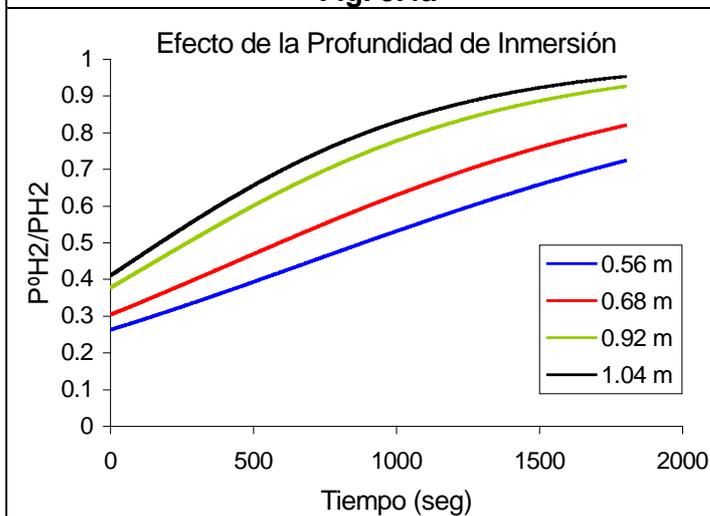


Fig. 5.4c

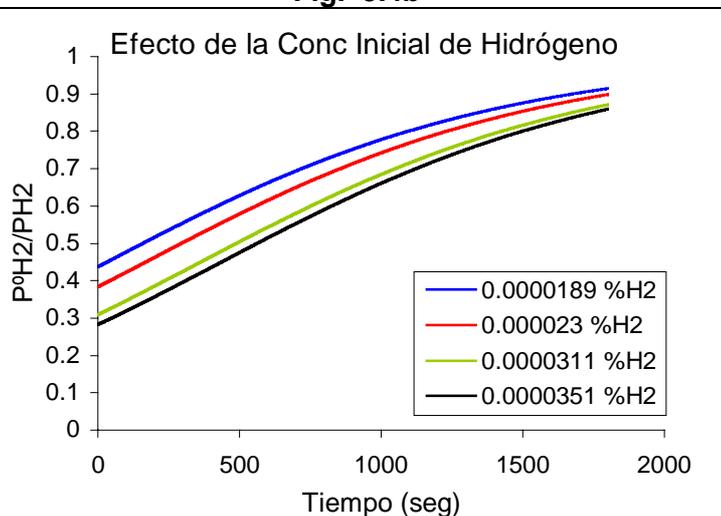


Fig. 5.4d

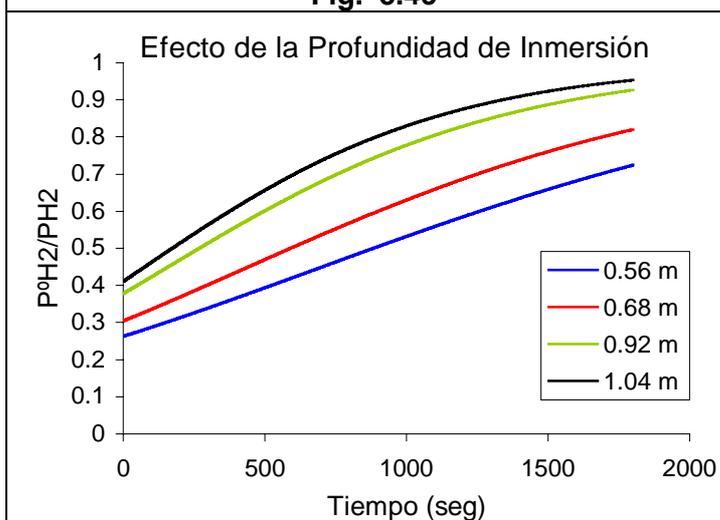


Fig. 5.4e

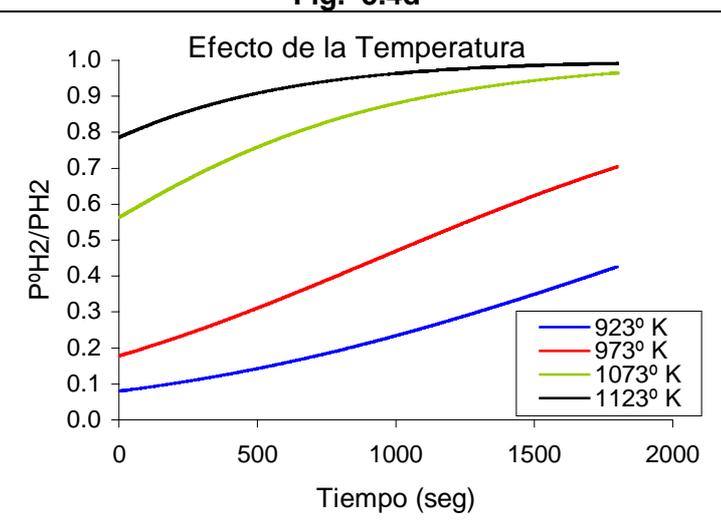
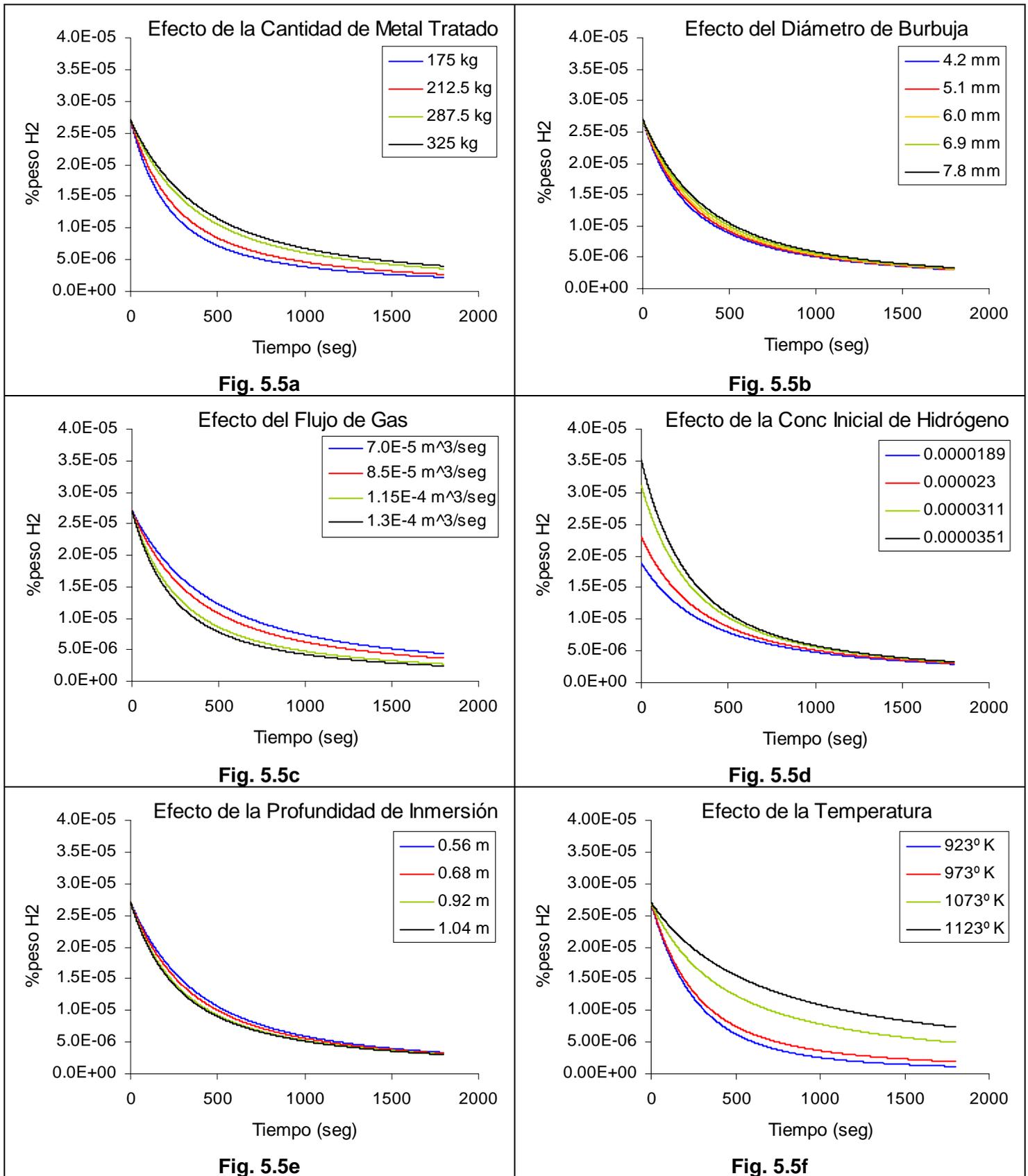
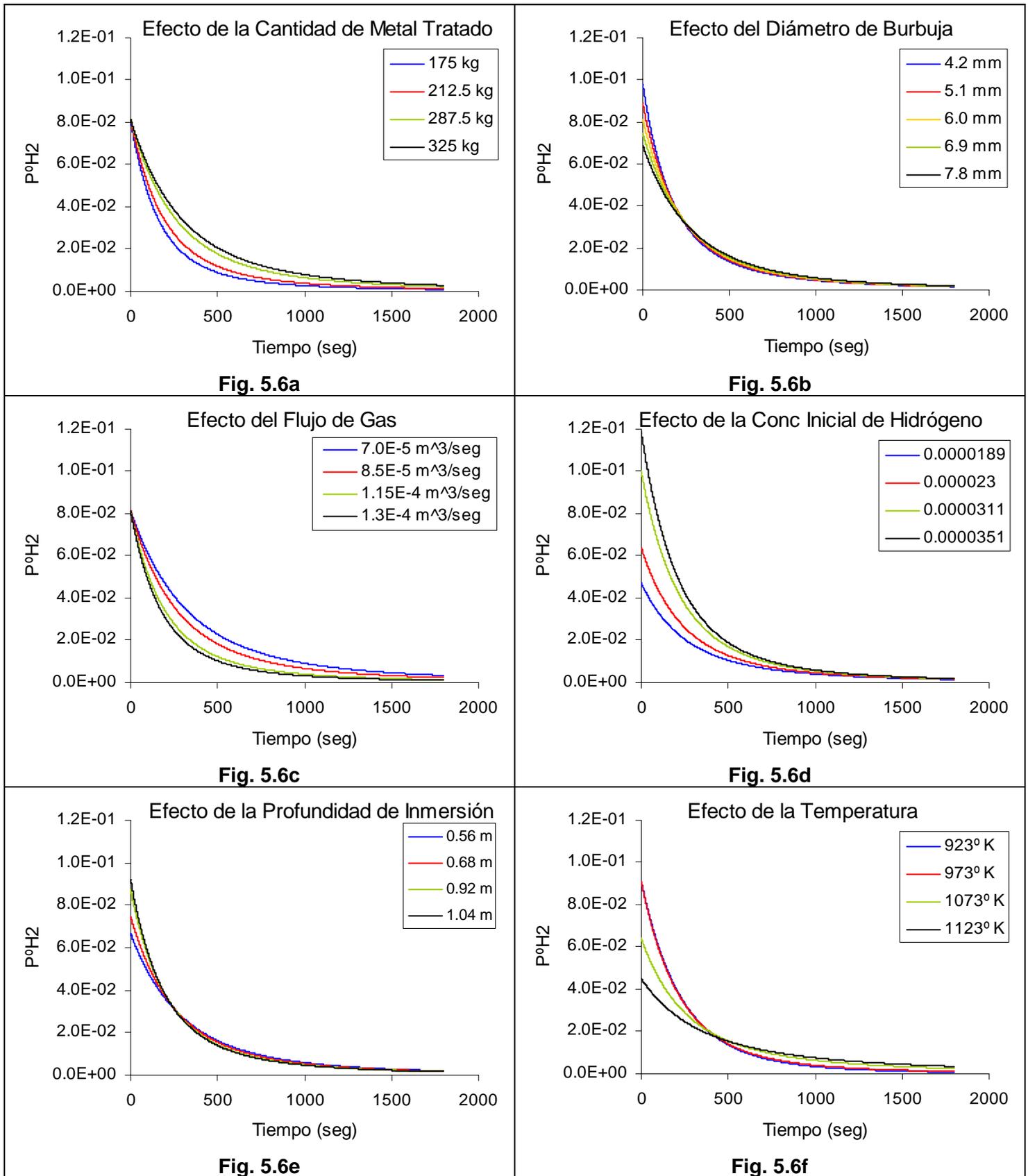


Fig. 5.4f

**Figura 5.4** Variación de la eficiencia de desgasificado con respecto al tiempo, con la correlación Cks1, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.



**Figura 5.5** Variación de la concentración de hidrógeno con respecto al tiempo, con la correlación Cks2, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.



**Figura 5.6** Variación de la presión parcial de hidrógeno a la salida del baño ( $P^{\circ}H_2$ ) con respecto al tiempo, con la correlación Cks2, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.

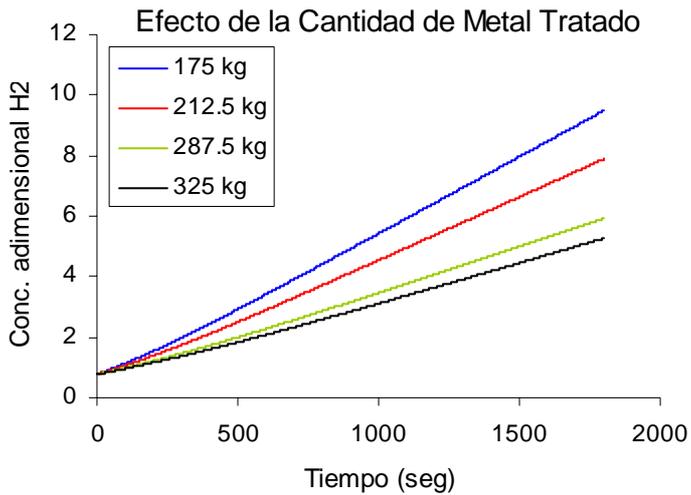


Fig. 5.7a

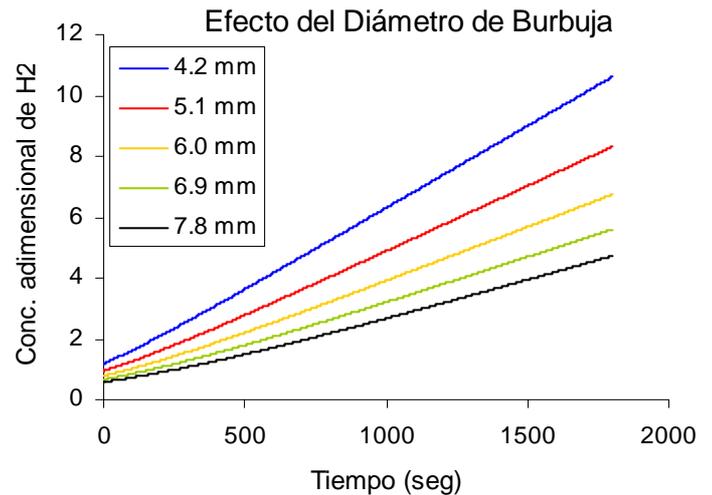


Fig. 5.7b

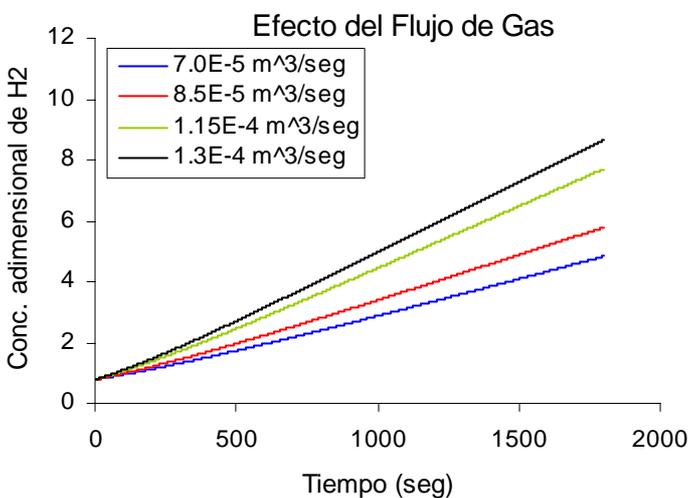


Fig. 5.7c

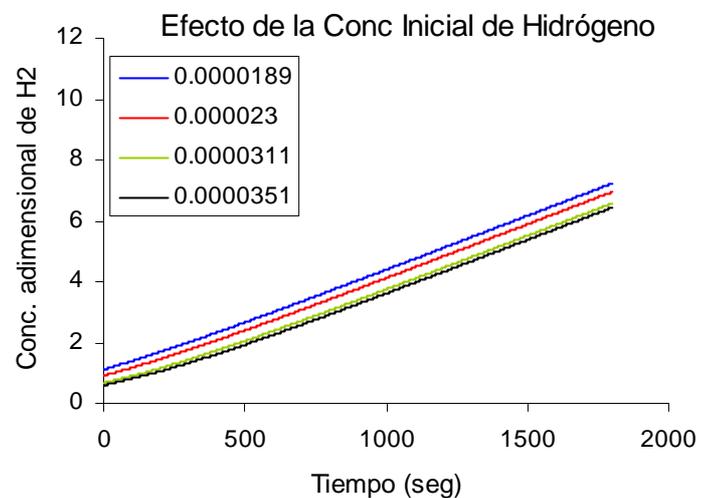


Fig. 5.7d

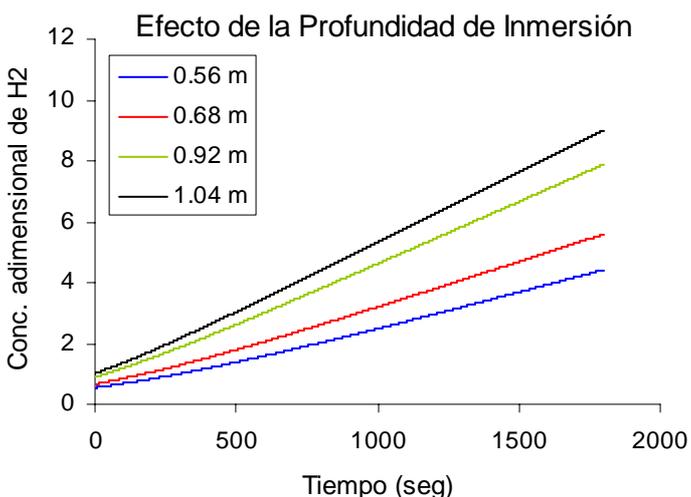


Fig. 5.7e

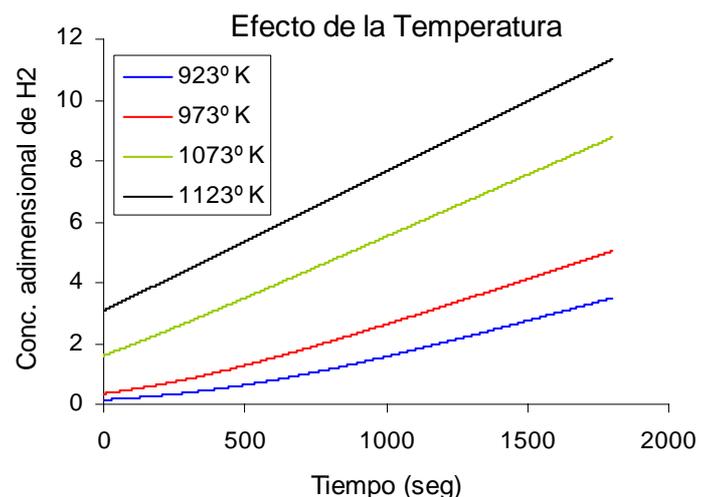


Fig. 5.7f

**Figura 5.7** Variación de la concentración adimensional de hidrógeno ( $\phi/[\text{pctH}]$ ) con respecto al tiempo, con la correlación Cks2, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.

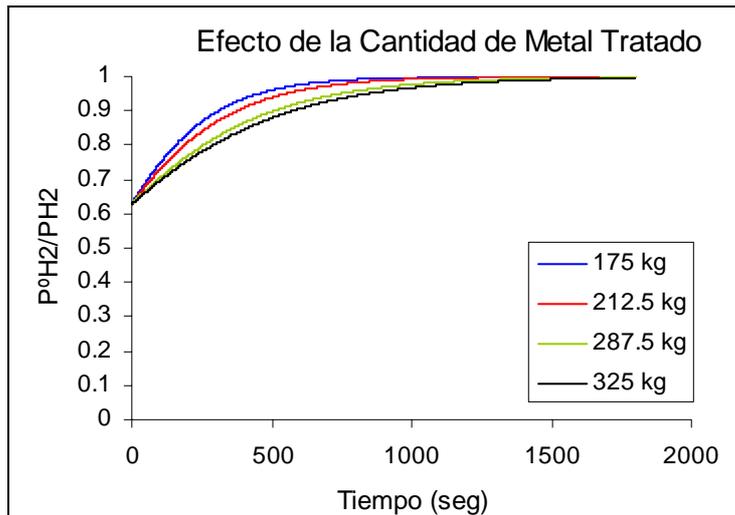


Fig. 5.8a

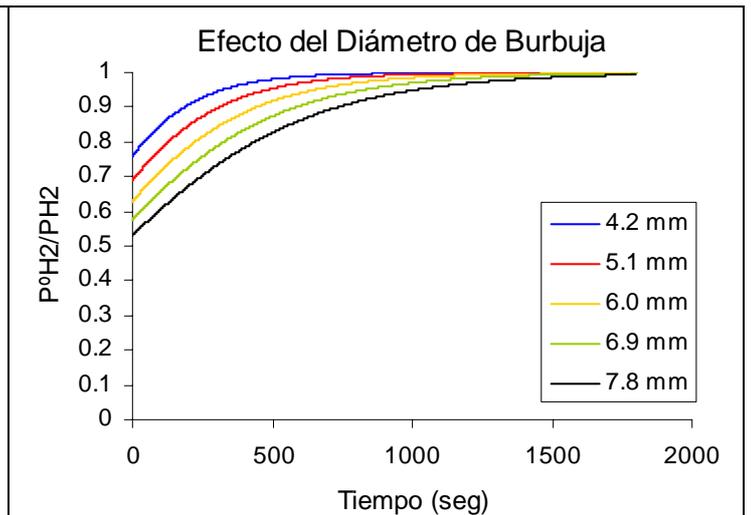


Fig. 5.8b

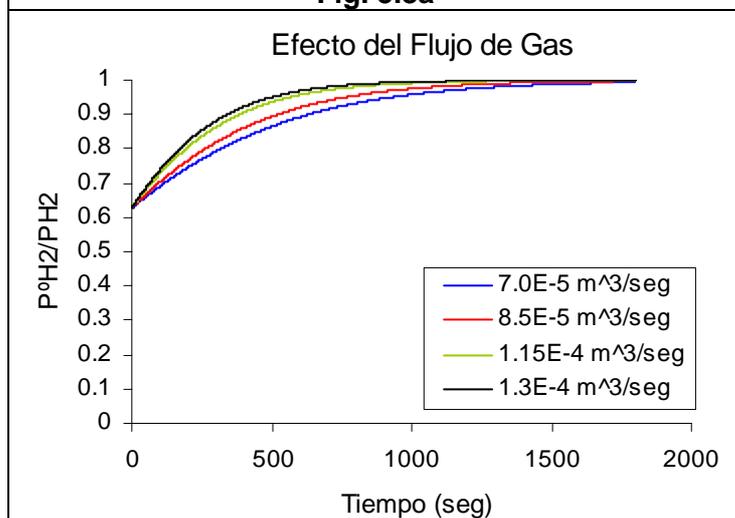


Fig. 5.8c

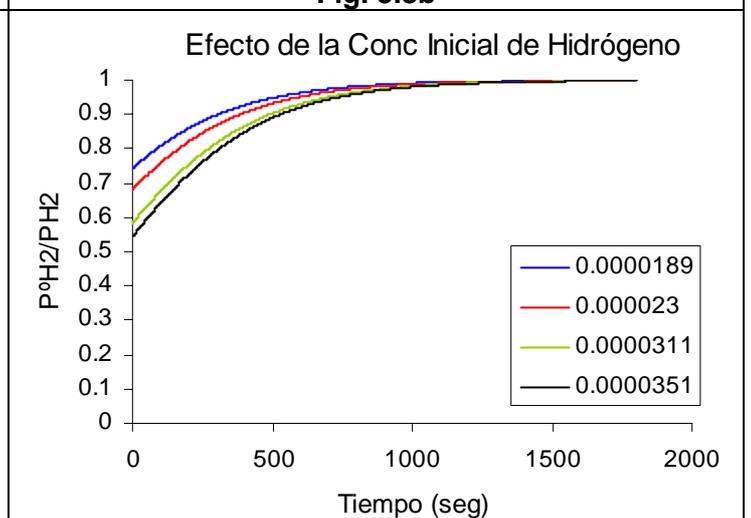


Fig. 5.8d

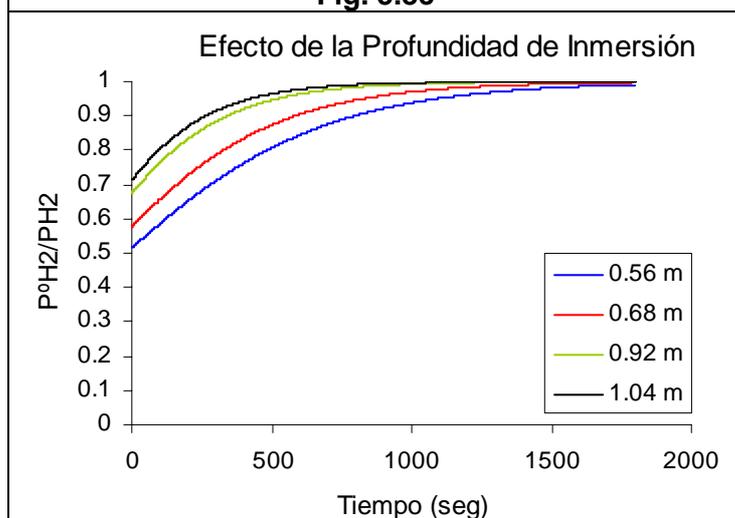


Fig. 5.8e

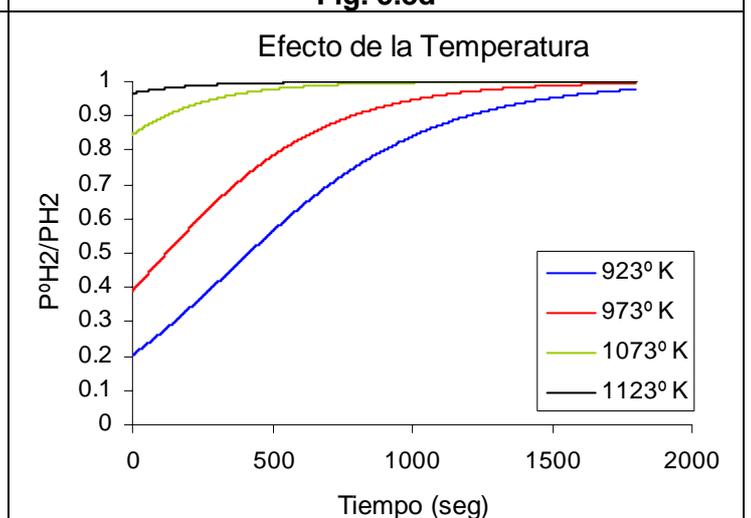


Fig. 5.8f

**Figura 5.8 Variación de la eficiencia de desgasificado con respecto al tiempo con la correlación Cks2, variando: a) masa de metal líquido, b) diámetro de burbuja, c) flujo de gas, d) contenido inicial de hidrógeno, e) profundidad de inmersión de la propela y f) temperatura de tratamiento.**

Los resultados que se presentan en este capítulo comparan dos distintas correlaciones empíricas para estimar el coeficiente de transferencia de masa, con el objetivo de analizar la sensibilidad de este parámetro empírico sobre las respuestas del sistema. Por esta razón, en la sección de resultados se presentan por duplicado gráficos de: concentración de hidrógeno, eficiencia de desgasificado, concentración adimensional de hidrógeno y presión parcial de las burbujas de gas a su salida del baño.

Para el análisis del proceso se presentan los efectos de las siguientes variables:

- a) Masa de aluminio (incisos a de cada figura)
- b) Diámetro de burbuja (incisos b de cada figura)
- c) Flujo de gas (incisos c de cada figura)
- d) Concentración inicial de hidrógeno en el aluminio (incisos d de cada figura)
- e) Profundidad de inmersión de la propela (incisos e de cada figura)
- f) Temperatura (incisos f de cada figura)

Sobre las siguientes respuestas del sistema:

- a) Concentración de hidrógeno vs tiempo de tratamiento (Figura 5.1 para Cks1 y 5.5 para Cks2). Estos resultados indican la concentración promedio instantánea del hidrógeno en el baño de aluminio en función del tiempo.
- b) Presión de salida de hidrógeno en las burbujas vs tiempo de tratamiento (Figura 5.2 para Cks1 y 5.6 para Cks2). Estos resultados indican la presión parcial de hidrógeno en las burbujas de gas justo a su salida del baño a través de la superficie libre, como una función del tiempo de tratamiento.
- c) Concentración adimensional de hidrógeno vs tiempos de tratamiento (Figura 5.3 para Cks1 y 5.7 para Cks2). Este parámetro indica el mecanismo de control que dicta la cinética de eliminación de hidrógeno: control de transporte o control químico para baños diluidos.
- d) Eficiencia de desgasificado vs tiempo de tratamiento (Figura 5.4 para Cks1 y 5.8 para Cks2). Este parámetro es el cociente de la presión de hidrógeno a la salida entre la presión de hidrógeno de equilibrio y por lo tanto nos indica el grado de cercanía o lejanía de la concentración de hidrógeno de equilibrio con la que las burbujas de gas dejan el baño. Valores cercanos a uno indican que las burbujas van saturadas con hidrógeno al final de su viaje y la eficiencia de desgasificado es elevada, mientras que valores cercanos a cero indican que el poder desgasificador de las burbujas se desperdicia (baja eficiencia de desgasificado).

## 5.1 CORRELACIÓN Cks1

### 5.1.1 CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO

En la Figura 5.1 se presentan los efectos de las variables exploradas en este estudio sobre la concentración instantánea de hidrógeno. Los perfiles de concentración de hidrógeno obtenidos (%peso  $H_2$  vs t en las Figuras 5.1a,b,c,d,e,f), presentan un perfil característico de una función exponencial decreciente, que conforme avanza el tiempo de tratamiento forma una asíntota.

En 5.1.a se observa el efecto de la masa de aluminio sobre la cinética de remoción de hidrógeno, en donde se aprecia que al aumentar la masa de aluminio, manteniendo las otras variables de operación constantes, la remoción de hidrógeno se hace más lenta. En 5.1.b se observa el efecto del tamaño de burbuja, en donde se aprecia que tamaños menores de burbuja aceleran la remoción de hidrógeno. En 5.1.c se presenta el análisis de variar el flujo de gas, en donde se detecta que al aumentar el flujo de gas se deshidrogena mejor. En 5.1.d se ve el efecto del contenido inicial de hidrógeno, por lo que las curvas parten al tiempo cero de distintos niveles de hidrógeno, pero al final del tratamiento ( $t=1800s$ ) se logran los mismos niveles residuales de hidrógeno sin importar su contenido inicial. En 5.1.e se ve que al aumentar la profundidad de inmersión se obtienen mejores cinéticas de deshidrogenación. Finalmente, en 5.1.f se ve que al aumentar la temperatura del baño se empeora la rapidez de remoción de hidrógeno.

### 5.1.2 PRESIÓN PARCIAL DE HIDRÓGENO A LA SALIDA

En la Figura 5.2 se presentan los efectos de las variables exploradas en este estudio sobre presión de salida de hidrógeno en las burbujas. Estos perfiles de presión de salida de hidrógeno en las burbujas obtenidos ( $P^0H_2$  vs t en las Figuras 5.2a,b,c,d,e,f), también presentan un perfil característico de una función exponencial decreciente, que conforme avanza el tiempo de tratamiento forma una asíntota.

En 5.2.a se observa el efecto de la masa de aluminio sobre la presión parcial de hidrógeno a la salida, en donde se aprecia que al principio en todos los casos salen las burbujas con la misma  $P^0H_2$ , pero en el caso de menor masa decae más rápido esta presión a la salida indicando mejor eficiencia en remoción de hidrógeno. En 5.2.b se observa el efecto del tamaño de burbuja en donde se aprecia que tamaños menores de burbuja presentan mucho mayor presión de hidrógeno a la salida en la etapa inicial de deshidrogenación, es decir, van más saturadas las burbujas pequeñas que las grandes y además con las burbujas pequeñas decae más rápido la  $P^0H_2$  con el tiempo que con burbujas grandes. En 5.2.c se presenta el análisis de variar el flujo de gas, en donde se detecta que al inicio la  $P^0H_2$  es igual para cualquier flujo de gas pero al aumentar el flujo de gas decae más rápido la  $P^0H_2$  con el tiempo. En 5.2.d se ve el efecto del contenido inicial de hidrógeno, por lo que las curvas parten al inicio de distintos niveles de  $P^0H_2$ , pero al final del tratamiento ( $t=1800s$ ) se logran los mismos niveles de  $P^0H_2$  sin importar su contenido inicial. En 5.2.e se ve que al aumentar la profundidad de inmersión se obtienen mayores niveles iniciales de  $P^0H_2$  y además estos decaen más rápido con el tiempo. Finalmente, en 5.2.f se ve que la temperatura del baño no afecta a la  $P^0H_2$ .

El flujo de gas y la cantidad de metal líquido son las variables que más afectan a la presión parcial de hidrógeno a la salida del baño, mientras que el diámetro de burbuja, profundidad de inmersión y concentración inicial de hidrógeno tiene un efecto moderado. Finalmente, la presión de hidrógeno a la salida no es sensible a la temperatura.

### 5.1.3 CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO

En la Figura 5.3 se presentan los efectos de las variables exploradas en este estudio sobre la concentración adimensional de hidrógeno. Los perfiles de concentración adimensional de hidrógeno obtenidos ( $\phi/pctH$  vs  $t$  en las Figuras 5.3 a,b,c,d,e,f), presentan un perfil característico de una función exponencial positiva, que conforme avanza el tiempo de tratamiento tiende al infinito en valores positivos.

En 5.3.a se observa el efecto de la masa de aluminio sobre la concentración adimensional de hidrógeno, en donde se aprecia que al disminuir la masa de aluminio, manteniendo las otras variables de operación constantes, este parámetro adimensional es mayor. En 5.3.b se observa el efecto del tamaño de burbuja en donde se aprecia que todos los perfiles inician de puntos diferentes y que tamaños menores de burbuja presentan valores mayores de concentración adimensional de hidrógeno. En 5.3.c se presenta el análisis de variar el flujo de gas inyectado, en donde se observa que la concentración adimensional de hidrógeno es igual al inicio para cualquier flujo de gas, y que al aumentar el flujo de gas la concentración adimensional de hidrógeno es mayor. En 5.3.d se ve el efecto del contenido inicial de hidrógeno, por lo que las curvas parten al tiempo cero de distintos valores de concentración adimensional de hidrógeno, conservando durante todo el tratamiento una separación proporcional a la variación de esta condición de proceso. En 5.3.e se ve que al aumentar la profundidad de inmersión se obtienen valores mayores de concentración adimensional de hidrógeno. Finalmente, en 5.3.f se ve que al aumentar la temperatura del baño, aumenta notablemente la concentración adimensional de hidrógeno. A 850° C el perfil presenta un comportamiento prácticamente lineal. La concentración adimensional es muy sensible a la temperatura y al diámetro de burbuja. También se afecta pero en menor proporción por la profundidad de inmersión de la propela, cantidad de metal tratado y flujo de gas. Finalmente, la variable que menos afecta a la concentración adimensional de hidrógeno es el contenido inicial en el baño.

### 5.1.4 EFICIENCIA DE DESGASIFICACIÓN

En la Figura 5.4 se presentan los efectos de las variables exploradas en este estudio sobre la eficiencia de desgasificado. Las curvas de eficiencia de desgasificado obtenidas ( $P^oH_2/PH_2$  vs  $t$  en las Figuras 5.4 a,b,c,d,e,f), presentan una forma característica de una función logarítmica, que conforme avanza el tiempo de tratamiento forma una asíntota al valor de 1 del eje de las ordenadas.

En 5.4.a se observa el efecto de la masa de aluminio sobre la eficiencia de desgasificado, en donde se aprecia que al disminuir la masa de aluminio, manteniendo las otras variables de operación constantes, la eficiencia del proceso es mayor en cualquier instante de tiempo. En 5.4.b se muestra el efecto del tamaño de burbuja, en donde se aprecia que todos los perfiles inician de puntos diferentes y tamaños menores de

burbuja favorecen una mejor eficiencia de desgasificado. En 5.4.c se presenta el análisis de variar el flujo de gas inyectado, en donde se observa que la eficiencia de desgasificado es igual al inicio para cualquier flujo de gas, y que al aumentar el flujo de gas la eficiencia aumenta. En 5.4.d se ve el efecto del contenido inicial de hidrógeno, por lo que las curvas parten al tiempo cero de distintos valores de eficiencia de desgasificado y al ser menor la concentración inicial de hidrógeno en el baño es más eficiente la remoción. Al final del tratamiento ( $t=1800s$ ) se obtienen eficiencias similares para cualquier valor de concentración inicial de hidrógeno. En 5.4.e se ve que al aumentar la profundidad de inmersión se obtiene una mejor eficiencia de desgasificado. Finalmente, en 5.4.f se ve que al aumentar la temperatura del baño, la eficiencia de desgasificado mejora notablemente, tanto que desde el inicio del tratamiento se tienen eficiencias de desgasificado ocho veces mayores trabajando a  $850^{\circ}C$  que a  $650^{\circ}C$ .

## **5.2 CORRELACIÓN Cks2**

Las cuatro respuestas del sistema exploradas en este trabajo (concentración de hidrógeno, presión parcial de las burbujas de gas a su salida del baño, concentración adimensional de hidrógeno y eficiencia de desgasificado) en función de las seis variables de diseño y operación analizadas (masa de aluminio, diámetro de burbuja, flujo de gas, concentración inicial de hidrógeno en el aluminio, profundidad de inmersión de la propela y temperatura, presentan cualitativamente un comportamiento muy similar para el caso de la correlación Cks2 en relación a los resultados obtenidos con la correlación Cks1 para el coeficiente de transferencia de masa.

A continuación reseñamos las diferencias más significativas encontradas en los resultados con las dos correlaciones para el coeficiente de transferencia de masa:

## **5.3 COMPARACIÓN ENTRE LA CORRELACIÓN Cks1 Y LA CORRELACIÓN Cks2**

### **5.3.1 CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO**

Se observa que la cinética de remoción de hidrógeno es más rápida con cualquiera de las variables de proceso manejadas en este trabajo cuando se usa la correlación Cks2. Los perfiles de concentración obtenidos con la correlación Cks2 decrecen rápidamente en la parte inicial del tratamiento, a comparación que los correspondientes a Cks1 que lo hacen suavemente.

Con respecto a la temperatura, se ve claramente un mayor efecto de la temperatura en los perfiles obtenidos cuando se usa la correlación Cks2 que usando la correlación Cks1. Cuando el proceso esta bajo condiciones de temperaturas elevadas, la cinética de remoción de hidrógeno es muy similar con cualquiera de las dos correlaciones empleadas, sin embargo, al trabajar en los valores menores de temperatura, se nota una diferencia notable entre los perfiles obtenidos con Cks1 y Cks2, siendo más rápida la cinética de remoción de hidrógeno con Cks2.

Ahora bien, el efecto del diámetro de burbuja y la profundidad de inmersión sobre la cinética de remoción de hidrógeno es pequeño al usar Cks2, sin embargo, la velocidad de remoción es mayor que los correspondientes a Cks1. Con Cks1 los perfiles de concentración presentan una mayor separación entre ellos, mostrando que el efecto de estas variables en el proceso es mayor. A pesar de ello la tasa de remoción de hidrógeno es menor.

Como se mencionó al inicio, las cinéticas de remoción de hidrógeno obtenidas con la correlación Cks2 son más rápidas, y esto es lo que puede observarse en las tres restantes variables de proceso por analizar (cantidad de metal tratado, flujo de gas inyectado o concentración inicial de hidrógeno en el baño), ya que los perfiles de concentración de hidrógeno correspondientes son muy similares, presentando una separación de las curvas de concentración, proporcional a la variación de la condición de proceso empleada.

### **5.3.2 PRESIÓN PARCIAL DE HIDRÓGENO A LA SALIDA**

Ahora bien, los gráficos correspondientes a la presión de salida en forma son muy similares a los perfiles de concentración de hidrógeno, con la diferencia que para ciertas variables de proceso (diámetro de burbuja, profundidad de inmersión y temperatura), todas las curvas en cierto instante de tiempo convergen en un mismo punto.

Los valores iniciales de presión de salida obtenidos con la correlación Cks2 son mucho mayores que los obtenidos con Cks1. Se observa que las curvas obtenidas con Cks2 durante los primeros minutos de tratamiento decaen de manera importante, y posteriormente forman una asíntota horizontal. Por otra parte las curvas obtenidas con Cks1 decrecen mucho más suavemente, incluso después de 30 minutos de tratamiento apenas se comienza a hacer notoria la tendencia a formar la asíntota, que con la correlación Cks2 se forma más rápidamente.

Con Cks2, los efectos del diámetro de burbuja y profundidad de inmersión de la propela sobre la presión de salida decaen con respecto a los mismos efectos obtenidos con Cks1. Lo contrario sucede con la temperatura, la cual no es muy importante sobre la presión de salida con Cks1 y crece su importancia usando Cks2. Con respecto a las tres variables de proceso restantes (cantidad de metal, flujo de gas y contenido inicial de hidrógeno) presentan tendencias o efectos similares con ambas correlaciones.

### **5.3.3 CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO**

Con respecto a este parámetro, se observa un comportamiento similar de los gráficos, con ambas correlaciones. Con la diferencia que los valores obtenidos con Cks2 son mucho mayores que los correspondientes a Cks1. Al inicio del tratamiento los valores que se obtienen son relativamente pequeños, más aún con Cks1; conforme avanza el tratamiento estos aumentan, con mayor notoriedad con Cks2. Este parámetro adimensional es de trascendental importancia en el estudio de la cinética de remoción de hidrógeno de baños de aluminio, ya que es un indicativo directo de cual es el mecanismo controlante en un tiempo determinado durante el proceso de desgasificado.

#### **5.3.4 EFICIENCIA DE DESGASIFICACIÓN**

Por último, al igual que en todos los resultados en este trabajo, los valores mayores de eficiencia de desgasificado se obtuvieron usando la correlación Cks2. Al inicio del tratamiento la correlación Cks1 reporta eficiencias de desgasificado muy pobres, mientras que las eficiencias con Cks2 son mucho mayores, prácticamente del doble. Usando la correlación Cks2 después de 12 minutos de tratamiento se obtienen eficiencias de desgasificado mayores del 90% con cualquiera de las condiciones de operación empleadas, a excepción de la temperatura. Mientras que usando Cks1 las eficiencias difícilmente alcanzan este valor, a menos que el tratamiento sea mucho más extenso y con los valores más favorecedores de las variables de proceso.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. EFECTO DE LA MASA DE ALUMINIO

Entre menor sea la cantidad de metal a desgasificar, mas rápida es la cinética de remoción de hidrógeno del baño, ya que para cierto flujo de gas inyectado, la relación de área superficial total de las burbujas entre el volumen de metal es mayor a menor cantidad de metal y entonces, se favorece que el hidrógeno sea transportado hacia el interior de las burbujas, ya que es más probable que el hidrógeno atómico disuelto en el aluminio alcance una burbuja para escapar. En otras palabras, a menor masa de metal hay una mejor distribución de las burbujas a través de todo el fundido.

### 6.2. EFECTO DEL TAMAÑO DE BURBUJA

Entre menor sea el tamaño de las burbujas, estas se encuentran mas cerca entre si y los átomos de hidrógeno disueltos tendrán una distancia corta de recorrido a través del baño para llegar a la superficie de la burbuja. El transporte a través de la fase líquida no es problema, siendo el transporte difusivo a través de la capa límite metal-gas de remoción el mecanismo controlante. Cuando el diámetro de burbuja disminuye, aumenta el área interfacial gas-metal y promueve la difusión de los átomos de hidrógeno hacia el interior de las burbujas y que las burbujas rápidamente alcancen niveles de saturación de hidrógeno, aumentando la capacidad del gas para remover el hidrógeno del baño, por lo tanto la concentración adimensional de hidrógeno se incrementa de manera significativa y el proceso se aproxima al equilibrio termodinámico, por lógica a eficiencias cercanas al 100%. En otras palabras, la eficiencia de desgasificación se incrementa con el aumento de la concentración adimensional de hidrógeno y esta es inversamente proporcional al tamaño de burbuja, como puede observarse la ecuación (28) del modelo matemático.

### 6.3. EFECTO DEL FLUJO DE GAS INYECTADO

Una mayor relación de área superficial total de burbuja entre el volumen de metal no basta para alcanzar niveles de remoción adecuados, ya que para un flujo de gas dado, las burbujas pequeñas rápidamente se saturan con hidrógeno no pudiendo absorber más hidrógeno del baño. Entonces, para alcanzar una mayor tasa de desgasificado, se debe aumentar el flujo de gas de remoción inyectado. El principio básico de remoción de hidrógeno por medio de un gas inerte radica en promover el transporte másico de esta especie por medio de la diferencia de concentraciones entre la burbuja y el hidrógeno disuelto en el aluminio, al aumentar el flujo de gas renovamos la presencia de burbujas libres de hidrógeno que absorban el hidrógeno atómico que escapa del metal líquido. Además, a mayor flujo de gas mayor es la agitación en el baño metálico y mejor mezclado estará este.

#### **6.4. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL DE HIDRÓGENO DEL BAÑO**

La cinética de remoción es más rápida mientras mayor sea la concentración inicial de hidrógeno en el baño. A mayor concentración inicial de hidrógeno en el aluminio líquido, se incrementa la fuerza motriz que promueve el transporte másico de hidrógeno necesario para la deshidrogenación y, por lo tanto, las rapidezces iniciales de desgasificado son mayores a contenidos iniciales de hidrógeno mayores. Sin embargo, cuando el nivel de hidrógeno en el baño decae a niveles en donde el control químico controla el proceso, el contenido inicial de hidrógeno no afecta la cinética de deshidrogenación.

#### **6.5. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE INMERSIÓN**

Otra variable importante es la velocidad de ascenso de las burbujas a través del baño. Mientras la propela se coloque a mayor profundidad, la distancia recorrida por las burbujas a través del metal es mayor, es decir, el tiempo de residencia de las burbujas en el baño es mayor, aumentando la capacidad del gas para remover el hidrógeno y por eso pueden deshidrogenar más al baño, siendo más eficiente el uso del gas. Burbujas pequeñas ascienden mas lentamente hacia la superficie que burbujas grandes debido al gran arrastre que se ejerce sobre la primera por parte del líquido, ya que presentan una mayor relación área/volumen. Adicionalmente, la eficiencia de desgasificación se incrementa con el aumento de la concentración adimensional de hidrógeno, que aumenta de manera significativa con una mayor profundidad de inmersión de la propela en el baño.

#### **6.6. EFECTO DE LA TEMPERATURA**

La temperatura desempeña un papel importante en la cinética de remoción de hidrógeno. Tanto la solubilidad como la presión parcial del hidrógeno en el baño disminuyen considerablemente con una disminución de temperatura del baño, provocando que el hidrógeno atómico disuelto abandone el aluminio líquido. Por lo tanto, la cinética de remoción de hidrógeno mejora a temperaturas más bajas del baño. De ahí, que la desgasificación en la práctica se debe llevar a cabo con la temperatura más baja que sea posible alcanzar para una operación particular. Sin embargo, la temperatura también afecta la difusividad de hidrógeno atómico en aluminio, siendo menor a menor temperatura. Es decir, la temperatura presenta efectos contrarios en la cinética de remoción de hidrógeno. En nuestros resultados predomina el efecto de la temperatura sobre la cantidad de hidrógeno disuelto.

#### **6.7. CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE HIDRÓGENO**

La concentración adimensional de hidrógeno ( $\varphi/[pctH]$ ) es un parámetro importante, ya que relaciona directamente la composición del gas que escapa del fundido con la eficiencia del gas de remoción usado para desgasificar y nos permite determinar que factores controlan el proceso. Cuando el valor de  $\varphi/[pctH]$  es pequeño, la eficiencia de desgasificado también lo es, ya que el gas esta alejado del equilibrio, por lo tanto, existe una zona donde la difusión de hidrógeno a través de la capa límite es el mecanismo controlante. Esta zona esta definida a valores de  $\varphi/[pctH] \leq 0.1$ . Así mismo existe una zona donde la remoción de hidrógeno es controlada estrictamente por factores químicos y es cuando la concentración adimensional de hidrógeno

$(\phi/[pctH]) \geq 1.0$ , entonces la eficiencia del proceso se aproxima al 100% por estar cerca del equilibrio. Ahora bien en el rango  $0.1 < \phi/[pctH] < 1.0$  existe un régimen de transición, donde tanto factores cinéticos y químicos controlan la remoción de hidrógeno.

### **6.8. SENSIBILIDAD DEL MODELO A LAS CORRELACIONES Cks1 y Cks2**

El sistema muestra una mayor sensibilidad a la correlación Cks2, la cual considera que el calor de activación es similar para diversos gases de remoción ( $N_2$ , Ar y  $Cl_2$ ), y que la variación del coeficiente de transferencia de masa solo depende del tamaño de la burbuja como una función de las características del fluido (aluminio líquido). Mientras que la correlación Cks1, considera el efecto de la variación del diámetro de la burbuja sobre la velocidad de ascenso. La correlación Cks1 indica que conforme el diámetro de la burbuja disminuye, la velocidad de ascenso es menor y, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de masa aumenta. También considera la difusividad del hidrógeno a través de la capa límite metal-gas de remoción.

## 7. CONCLUSIONES.

La caracterización mediante relaciones matemáticas para describir la remoción de hidrógeno de baños de aluminio fundido, basadas en el modelo matemático desarrollado por T.A. Engh, nos permite conocer de manera cuantitativa, la influencia de diversas variables de diseño y operación en el proceso de desgasificado, y determinar las condiciones óptimas de operación.

La modelación matemática es una herramienta fundamental en el análisis de procesos, que nos permite cuantificar las condiciones de diseño y operación más favorables para el mejor desempeño del proceso de desgasificación. Una menor masa aluminio a desgasificar, diámetros de burbuja pequeños, aumentar el flujo de gas de remoción, una mayor concentración inicial de hidrógeno en el baño, colocar la propela de inyección a una mayor profundidad y trabajar a la menor temperatura de proceso posible, son las condiciones óptimas para llevar a cabo la remoción de hidrógeno de baños de aluminio fundido.

De acuerdo a las condiciones estándar típicas en la industria consideradas en este trabajo, la eficiencia mas alta del proceso de desgasificado de aluminio fundido, se alcanza en un baño de 175 kg de aluminio fundido, que al inicio del tratamiento tenga una concentración de hidrógeno de  $3.51E-5 \%H_2$ , inyectando un flujo de gas de remoción de  $1.3E-4 m^3/s$ , a una profundidad de 1.04 m y genere burbujas de 5 mm de diámetro o menores, a una temperatura de operación de  $650^\circ C$ .

La variable más importante y que determina el nivel de hidrógeno al final del desgasificado según los resultados de este trabajo, es la temperatura de operación. Esta presenta efectos contrarios en la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido y en la difusividad a través de la intercara gas-metal. Adicionalmente, burbujas de menor tamaño, presentan una mejor distribución en todo el volumen del baño, generando un contacto máximo entre burbujas y metal líquido, favoreciendo que la cinética de remoción de hidrógeno sea mejor.

## 8. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

1. Encuesta Anual de la Industria de la Fundición, Revista Foundry 2002, Virginia D Cahill.
2. Forecast shows 5.1% shipment increase in 2004, 1.8% demand jump by 2009", Kenneth H. Kirgin, Stratecasts, Inc., Fort Myers, La Florida
3. 37th Census of World Casting Production, Modern Casting Staff Reporting, December 2003.
4. Estadística Nacional de la Industria de la Fundición, Sociedad Mexicana de Fundidores, Oswaldo Chávez González, Ricardo Martínez Raza, Mauricio Juárez Caballero, 1998.
5. Encuesta Industrial Mensual, Industrias Metálicas Básicas, Fundición, Laminación, Extrusión, Refinación y/o Estiraje de Aluminio, INEGI, 2004.
6. In Search of Ligth-Weigth Components: Automotive's Cast Aluminium Conversion, Stratecasts, Inc., Ft. Myers, Florida.
7. El Momento Brillante del Aluminio, Revista Foundry 2003, Virginia D Cahill.
8. Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys. John E. Gruzleski, Bernard Closset. American Foundrymens Society, Junio 1990, Capítulos 9 y 10.
9. Tecnología de los Procesos Metalúrgicos, R.A. Higgins, Ed Continental, pp36.
10. Chemical and kinetics factors related to hydrogen removal from aluminum, G.K Sigworth and T.A Engh, Metallurgical Transactions, ASM and The metallurgical society of AIME, September 1982, pp 442-460.
11. Advances in degassing aluminium alloys, D.W Pattle Development manager of international LTD, Birmingham, England.
12. Improvements in Cast Shop Processing Using Pyrotek's HD-2000 and PHD-50 Rotary Injector System, Peter J. Flisakowski; J. Mickey McCollum; Robert A. Frank, The Minerals, Metals & Materials Society, Light Metals 2001, pp 1041-47.
13. Efficiency Modeling of Rotary Degasser Head Configurations and Gas Introduction Methods, Part I: Water Tank Tests, Kevin A. Carpenter and Michael J. Hanagan, Blasch Precision Ceramics, Light Metals 2001, pp 1017-20.
14. Hydrogen solubility in aluminium and some aluminium alloys, W.R Opie and N.J Grant, AIME, vol 8 (1950), pp1237-41.
15. Principles of metal refining, T.A Engh, Oxford University Press, 1992, Cap 9, pp 204.
16. A new in-line aluminium treatment system using non-toxic gases and a gas-permeable vessel bottom, D. Saha, J.S Becker and L. Gluns, The minerals, metals and materials society, 1989, pp 855-877.
17. Metals handbook, casting (vol 15), ninth edition 1988, pp 59.

## 9. APENDICES

### 9.1 APÉNDICE A.

- Correlaciones de coeficientes empíricos de transferencia de masa

$$Cks_1 = 0.0128 \cdot \left( \frac{D_H \cdot v_{elas}}{d_b} \right)^{1/2} \quad \text{ref. (16)}$$

donde:  $D_H$ : Coeficiente de difusión de hidrógeno en aluminio (m<sup>2</sup>/s)

$v_{elas}$ : Velocidad de ascenso de las burbujas (m/s)

$d_b$ : Diámetro de burbuja (m)

$$Cks_2 = 0.0122 \cdot \exp\left(\frac{-5900}{R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{d_b}{1.37}\right)^{-1/4} \quad \text{ref. (10)}$$

donde:  $R$ : Constante universal de los gases (cal/g-mol·°K)

$T$ : Temperatura (°K)

$d_b$ : Diámetro de burbuja (m)

- Correlaciones de la velocidad de ascenso de la burbuja en el baño

$$v_{elas1} = 1.02 \cdot \left( \frac{g \cdot d_b}{2} \right)^{1/2} \quad \text{ref. (16)}$$

donde:  $v_{elas1}$ : Velocidad de ascenso de las burbujas (m/s)

$g$ : Aceleración por la gravedad (cm/s<sup>2</sup>)

$d_b$ : Diámetro de burbuja (m)

$$v_{elas2} = 4 \times 10^6 \cdot d_b^3 - 38417 \cdot d_b^2 + 182.67 \cdot d_b - 0.0282$$

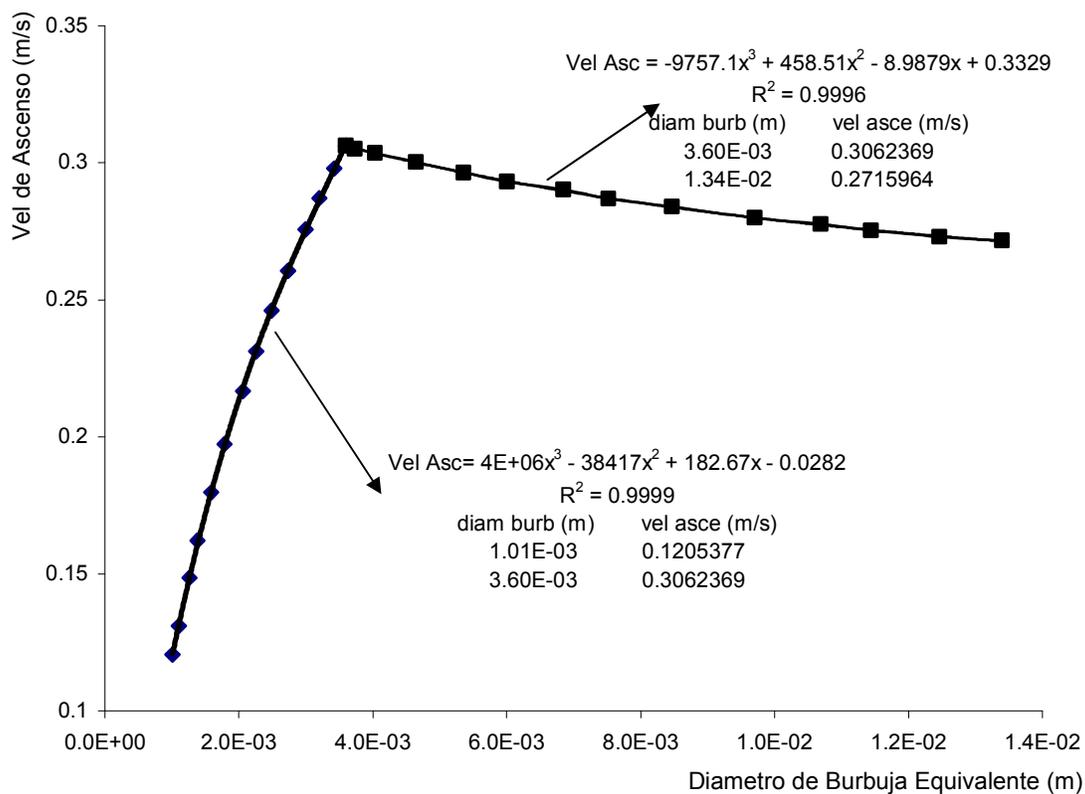
o

ref. (15)

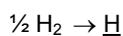
$$v_{elas2} = -9757 \cdot d_b^3 + 458.5 \cdot d_b^2 - 8.9879 \cdot d_b + 0.3329$$

donde:  $v_{elas2}$ : Velocidad de ascenso de las burbujas (m/s)

$d_b$ : Diámetro de burbuja (m)



- Correlación de la energía libre de Gibbs para la reacción de disolución de hidrógeno



$$\Delta G^\circ = 11664 + 6.523 \cdot T \quad \text{ref. (17)}$$

donde:  $\Delta G^\circ$ : Energía Libre de Gibbs (cal/g-mol)

$T$ : Temperatura (°K)

- Coefficiente de difusión de hidrógeno en aluminio

$$D_H = 0.385 \cdot \exp\left(\frac{-16400}{R \cdot T}\right) \quad \text{ref. (10)}$$

donde:  $D_H$ : Coeficiente de difusión de hidrógeno en aluminio ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $R$ : Constante universal de los gases ( $\text{cal/g-mol}\cdot^\circ\text{K}$ )  
 $T$ : Temperatura ( $^\circ\text{K}$ )

- Área total de la superficie de las burbujas

$$A = \left( \frac{6 \cdot Q_g \cdot h}{d_b \cdot v_{elas}} \right) \quad \text{ref. (15)}$$

donde:  $A$ : Área total de la superficie de las burbujas  
 $Q_g$ : Flujo volumétrico del gas de remoción inyectado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $h$ : Profundidad de inmersión del impeler (m)  
 $v_{elas}$ : Velocidad de ascenso de las burbujas (m/s)  
 $d_b$ : Diámetro de burbuja (m)

- Flujo másico del gas de remoción inyectado

$$G = \left( \frac{P_{inerte} \cdot 1.01 \times 10^5 Q_g}{T \cdot 8.314 \cdot 1000} \right)$$

donde:  $G$ : Flujo másico del gas de remoción inyectado ( $\text{kg-mol/s}$ )  
 $P_{inerte}$ : Presión de las burbujas al inicio del tratamiento (atm)  
 $Q_g$ : Flujo volumínico del gas de remoción inyectado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $T$ : Temperatura ( $^\circ\text{K}$ )

## 9.2 APÉNDICE B.

OPEN(60,FILE='pctH\_vs\_t.txt',STATUS='unknown')

OPEN(61,FILE='Z2\_vs\_t.txt',STATUS='unknown')

OPEN(62,FILE='Psalida\_vs\_t.txt',STATUS='unknown')

OPEN(63,FILE='PSI\_pctH\_vs\_t.txt',STATUS='unknown')

c db= diámetro de la burbuja en m

c velas= velocidad de ascenso de burbujas en m/s

c T= temperatura en K

c Ceq= K constante de equilibrio

c fh= coeficiente henriano de actividad del hidrógeno

c CAI= composición de aluminio en % en peso en aleación 356

c CSi= composición de silicio en % en peso en aleación 356

c CMg= composición de magnesio en % en peso en aleación 356

c densidad= densidad de la aleación 356

c Dh= coeficiente de difusión de hidrógeno en Al ( $m^2/s$ )

c A= área total interfacial de burbujas-Al

c Qg= flujo de gas en  $m^3/s$

c h= profundidad del impeler en m

c cks1= correlación de ks artículo 6

c cks2= correlación de ks ec 43

c M= masa del metal a tratar

c Pinert= Presión de la burbujas al inicio

c G = flujo másico de gas inerte en kg-mol/sec

c pctHi = porcentaje inicial de hidrógeno

c Mh = Peso atómico del hidrógeno

c E= parámetro numérico no función del tiempo =  $2M/(cks1*densidad*Area)$

cPSI=parámetro.num.indep.tiempo= $(cks1*densidad*Area*Pinert*Ceq**2)/(400.*(fh**2)*Mh*G)$

c B= parámetro numérico no función del tiempo =  $E*PSI$

c ei= constante de integración al tiempo 0

c fei= función de donde se obtendrán la raíz "ei"

c dei= derivada de fei

c ein= nueva iteración para ei

c tt tiempo en segundos

c pctH= porcentaje de hidrógeno instantáneo

c pctHinv=  $1/pctH$

c Z=(Psalida de hidrogeno)\*\*.5/(Peq de hidrogeno)\*\*.5

c Psalida= presión parcial de hidrógeno a la salida del baño

c Peqraiz= raíz cuadrada de la presión parcial de hidrógeno en equilibrio

## c ASIGNACIÓN DE DATOS CONSTANTES

```

fh=1.6106
CAI=92.7
CSi=7.0
CMg=0.3
densidad=2505.0
Pinert=3.65
Mh=1.0

```

## C ASIGNACIÓN DE VARIABLES

```

db=
T=
Qg=
h=
M=
pctHi=

```

## c ASIGNACIÓN DE CORRELACIONES

```

velas1=1.02*(9.81*db/2.0)**0.5
If (db.le.3.6e-3) then
velas2=(4.e+6)*(db**3)-(38417.0)*(db**2)+182.67*db-.0282
else
velas2=-9757.0*(db**3)+458.5*(db**2)-8.9879*db+0.3329
endif
Ceq=exp((-5870.15/T)-3.2828)
Dh=0.385*exp(-16400.0/(1.987*T))
G=(Pinert*1.01e05*Qg)/(T*8.314*1000.0)
Area=(6.0*Qg*h)/(db*velas2)
cks1=0.0128*((Dh*velas2)/db)**0.5
cks2=0.0122*exp(-5900.0/(1.987*T))*(db/1.37)**(-0.25)

```

## c FIN DE ASIGNACIÓN DE VARIABLES

## c CÁLCULO DE PARÁMETROS

```

E=(2.0*M)/(cks1*densidad*Area)
PSI=(cks1*densidad*Area*Pinert*Ceq**2)/(400.0*(fh**2)*Mh*G)
B=E*PSI

```

## c CALCULO DE ei POR NEWTON-RAPHSON

```

ei=.1
10 fei=-((ei/(1+ei))+log(1+ei)-(PSI/pctHi))
dei=-((1/(1+ei)**2)+(1/(1+ei)))

```

```

ein=ei-(fei/dei)
error=(abs(ein-ei)/ei)*100.
if (error.gt.0.01) then
ei=ein
goto 10
else
endif

c CALCULO DE pctH vs tiempo
c CALCULO DE Z vs tiempo
c CALCULO DE PH2 SALIDA vs tiempo
tt=0.0
do i=0, 1800
tt=float(i)
pctHinv=(1/pctHi)+(E/B)*((1/(1+(1/ei)))-(exp(tt/E)/(exp(tt/E)+
&(1/ei)))+log((1+ei*exp(tt/E))/(1+ei)))
pctH=1/pctHinv
WRITE(60,*)tt,pctH
Z=(ei*exp(tt/E))/(1+ei*exp(tt/E))
Peqraiz=pctH*fh/Ceq
Psalida=(Z**2)*Peqraiz**2

WRITE(61,*)tt,Z**2
WRITE(62,*)tt,Psalida
WRITE(63,*)tt,PSI/pctH
enddo
end

```

## 9.3 APÉNDICE C.

LISTA DE SÍMBOLOS USADOS  
MODELO MATEMATICO

Hidrógeno molecular en estado gaseoso	$[H_2]$
Hidrógeno atómico diluido en metal líquido	$(H)$
Constante termodinámica de equilibrio para la disolución de hidrógeno	$Keq$
Actividad henriana [%peso]	$d^h_H$
Coefficiente de actividad henriano [%peso]	$f_H$
Constante de Sievert	$Ks$
Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro [ $cm^3 H_2 / 100 \text{ gr Al}$ ]	$S_H$
Parámetro de iteración de primer orden del hidrógeno	$e^H_H$
Parámetro de iteración de primer orden del silicio	$e^{Si}_H$
Parámetro de iteración de primer orden del magnesio	$e^{Mg}_H$
Coefficiente de transferencia de masa para hidrógeno [m/s]	$k$
Densidad de aleación A-356 líquida [ $kg/m^3$ ]	$\rho$
Área de contacto [ $m^2$ ]	$A$
Cantidad de metal tratado [kg]	$M$
Profundidad de inmersión del impeler [m]	$h$
Temperatura absoluta [ $^{\circ}K$ ]	$T$
Eficiencia de desgasificado	$Z$
Grupo adimensional relacionado con la composición del gas a la salida	$J$
Parámetro numérico independiente del tiempo [adim]	$B$
Parámetro numérico independiente del tiempo [adim]	$E$
Concentración de hidrógeno adimensional [adim]	$\varphi: [pct H]$
Peso molecular del hidrógeno [ $kg H / kg\text{-mol H}$ ]	$m_H$
Concentración de hidrógeno al equilibrio [% peso]	$[pct H]_{eq}$
Concentración de hidrógeno disuelto [% peso]	$[pct H]$
Concentración de silicio disuelto [% peso]	$[pct Si]$
Concentración de magnesio disuelto [% peso]	$[pct Mg]$
Flujo másico de gas inerte [ $Kg\text{-mol inerte} / s$ ]	$G$
Presión de hidrógeno al equilibrio [atm]	$PH_2$
Presión de hidrógeno de la burbuja en la superficie del fundido [atm]	$P^{\circ}H_2$
Presión de gas de remoción [atm]	$P_{inerte}$
Concentración inicial de Hidrógeno disuelto [% peso]	$[pct H]_i$
Concentración final de Hidrógeno disuelto [% peso]	$[pct H]_f$
Constante de integración (Ec. 45)	$e_i$
Tiempo [s]	$t$