

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DEL  
RECICLADO DE ALEACIONES DE MAGNESIO**

**María Rodríguez**  
Maestranda

**Dr. Facundo Castro**  
Director

**Dra. Guillermina Urretavizcaya**  
Co-directora

**Miembros del Jurado**

Dr. Julio Andrade Gamboa (Centro Atómico Bariloche)

Dra. Georgina De Micco (Centro Atómico Bariloche)

Dra. Liliana Mogni (Centro Atómico Bariloche)

Noviembre de 2021

Departamento Fisicoquímica de Materiales - Gerencia de  
Investigación Aplicada - Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina

# Índice de contenidos

Índice de contenidos	i
Resumen	v
Abstract	vii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles . . . . .	1
1.2. Tecnologías de producción de H <sub>2</sub> . . . . .	2
1.2.1. Producción de H <sub>2</sub> a partir de combustibles fósiles . . . . .	2
1.2.2. Producción de H <sub>2</sub> a partir de fuentes renovables . . . . .	4
1.3. Producción de H <sub>2</sub> por hidrólisis . . . . .	6
1.3.1. Hidrólisis: características generales, ventajas y desventajas . . .	7
1.3.2. Alternativas para mejorar la hidrólisis de los materiales basados en Mg . . . . .	8
1.3.3. Materiales de descarte de aleaciones de Mg . . . . .	10
1.4. Presentación del trabajo . . . . .	12
<b>2. Técnicas experimentales, metodología y materiales</b>	<b>15</b>
2.1. Molienda mecánica . . . . .	15
2.1.1. Equipo de molienda . . . . .	16
2.1.2. Parámetros de molienda . . . . .	17
2.1.3. Condiciones experimentales . . . . .	18
2.2. Microscopía Electrónica de Barrido . . . . .	19
2.2.1. Condiciones de medición . . . . .	20
2.3. Difracción de Rayos X . . . . .	20
2.3.1. Condiciones de medición . . . . .	21
2.3.2. Ajuste de los difractogramas: refinamiento Rietveld . . . . .	21
2.4. Reacción de hidrólisis . . . . .	24
2.4.1. Procedimiento de medición . . . . .	24
2.4.2. Cálculo de la cantidad de hidrógeno producido . . . . .	25

---

2.4.3.	Repetibilidad e incerteza de las mediciones . . . . .	27
2.4.4.	Procedimiento de análisis de las curvas de producción de hidrógeno	28
2.5.	Material base . . . . .	32
2.5.1.	Caracterización con SEM . . . . .	32
2.5.2.	Caracterización con DRX . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>Materiales molidos sin aditivos</b>	<b>35</b>
3.1.	Distribución de tamaños . . . . .	36
3.2.	Caracterización con SEM . . . . .	36
3.2.1.	Observaciones morfológicas . . . . .	36
3.2.2.	Mapeos EDS . . . . .	39
3.3.	Caracterización con DRX . . . . .	40
3.4.	Reacción de hidrólisis . . . . .	43
3.4.1.	Análisis de la capacidad de los materiales . . . . .	45
3.4.2.	Análisis de la velocidad de reacción . . . . .	46
3.4.3.	Análisis de desempeño . . . . .	47
3.4.4.	Mecanismo de reacción . . . . .	48
3.4.5.	Análisis del residuo de la reacción . . . . .	52
3.4.6.	Efecto de la exposición a la atmósfera . . . . .	53
3.5.	Conclusiones . . . . .	54
<b>4.</b>	<b>Materiales molidos con grafito desde el inicio</b>	<b>55</b>
4.1.	Distribución de tamaños . . . . .	56
4.2.	Caracterización con SEM . . . . .	57
4.2.1.	Observaciones morfológicas . . . . .	57
4.2.2.	Mapeos EDS . . . . .	60
4.3.	Caracterización con DRX . . . . .	61
4.4.	Reacción de hidrólisis . . . . .	65
4.4.1.	Análisis de desempeño . . . . .	66
4.4.2.	Mecanismos de reacción . . . . .	67
4.4.3.	Análisis del residuo de la reacción . . . . .	70
4.5.	Conclusiones . . . . .	72
<b>5.</b>	<b>Materiales con grafito agregado con mortero</b>	<b>73</b>
5.1.	Preparación de muestras . . . . .	74
5.2.	Caracterización con SEM . . . . .	75
5.3.	Caracterización con DRX . . . . .	76
5.4.	Reacción de hidrólisis . . . . .	76
5.4.1.	Análisis de la capacidad de producción de hidrógeno . . . . .	76
5.4.2.	Análisis del residuo de la reacción . . . . .	78

---

5.4.3.	Análisis de la velocidad de reacción . . . . .	79
5.4.4.	Material con 5 % <i>p/p</i> de grafito agregado con mortero al material molido 20h sin aditivos . . . . .	80
5.4.5.	Mecanismo de reacción . . . . .	81
5.5.	Conclusiones . . . . .	83
<b>6.</b>	<b>Materiales premolidos con grafito agregado en molienda posterior</b>	<b>84</b>
6.1.	Preparación de muestras . . . . .	85
6.2.	Caracterización con SEM . . . . .	85
6.2.1.	Mapeos EDS . . . . .	85
6.2.2.	Observaciones morfológicas . . . . .	87
6.3.	Caracterización con DRX . . . . .	88
6.4.	Reacción de hidrólisis . . . . .	91
6.4.1.	Análisis de la capacidad de reacción . . . . .	91
6.4.2.	Análisis de la velocidad . . . . .	93
6.4.3.	Análisis de desempeño . . . . .	94
6.4.4.	Mecanismos de reacción . . . . .	96
6.5.	Efecto del hierro . . . . .	99
6.6.	Conclusiones . . . . .	100
<b>7.</b>	<b>Materiales con hierro y grafito agregados</b>	<b>101</b>
7.1.	Preparación de muestras . . . . .	102
7.2.	Distribución de tamaños . . . . .	102
7.3.	Caracterización con SEM . . . . .	103
7.3.1.	Partículas menores a 100 $\mu\text{m}$ . . . . .	103
7.3.2.	Partículas entre 100 $\mu\text{m}$ y 200 $\mu\text{m}$ . . . . .	104
7.4.	Caracterización con DRX . . . . .	105
7.5.	Reacción de hidrólisis . . . . .	106
7.5.1.	Análisis de la capacidad de reacción . . . . .	106
7.5.2.	Análisis de la velocidad . . . . .	108
7.5.3.	Análisis de desempeño . . . . .	108
7.5.4.	Análisis del residuo . . . . .	109
7.5.5.	Mecanismo de reacción . . . . .	112
7.6.	Conclusiones . . . . .	114
<b>8.</b>	<b>Aplicación a virutas de descarte de la industria automotriz</b>	<b>115</b>
8.1.	Material base . . . . .	116
8.2.	Distribución de tamaños . . . . .	117
8.3.	Caracterización con SEM . . . . .	118
8.3.1.	Partículas menores a 100 $\mu\text{m}$ . . . . .	118

---

8.3.2. Partículas entre 100 $\mu\text{m}$ y 200 $\mu\text{m}$ . . . . .	119
8.4. Caracterización con DRX . . . . .	120
8.5. Reacción de hidrólisis . . . . .	121
8.5.1. Análisis de la capacidad . . . . .	121
8.5.2. Análisis de la velocidad . . . . .	123
8.5.3. Mecanismo de reacción . . . . .	124
8.6. Conclusiones . . . . .	126
<b>9. Discusión y conclusiones generales</b>	<b>127</b>
9.1. Influencia de la atmósfera de molienda . . . . .	127
9.2. Comparación con otros materiales base Mg . . . . .	130
9.3. Conclusiones y trabajo a futuro . . . . .	132
<b>A. Apéndice A: Modelos cinéticos</b>	<b>134</b>
<b>B. Apéndice B: Material complementario al Capítulo 3</b>	<b>135</b>
B.1. Caracterización con SEM . . . . .	135
B.2. Caracterización con DRX . . . . .	136
B.3. Reacción de hidrólisis . . . . .	136
B.4. Modelos cinéticos . . . . .	137
<b>C. Apéndice C: Material complementario al Capítulo 4</b>	<b>138</b>
C.1. Caracterización con DRX . . . . .	138
C.2. Reacción de hidrólisis . . . . .	139
C.3. Modelos cinéticos . . . . .	139
<b>D. Apéndice D: Efecto de la presencia de una distribución de tamaños de partículas en las curvas cinéticas del modelo R3</b>	<b>140</b>
<b>E. Apéndice D: Material complementario a los Capítulos 6 y 7</b>	<b>144</b>
E.1. Capítulo 6 . . . . .	145
E.1.1. Mecanismos de reacción . . . . .	145
E.2. Capítulo 7 . . . . .	146
E.2.1. Caracterización con DRX . . . . .	146
E.2.2. Mecanismo de reacción . . . . .	146
<b>Bibliografía</b>	<b>147</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>153</b>