

# Índice general

<b>Índice de tablas</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Naturaleza de los Molinos SAG . . . . .	3
2.2. Naturaleza de los revestimientos . . . . .	4
2.3. Desgaste abrasivo e influencia de la microestructura . . . . .	5
2.4. Austenita y tamaño de grano . . . . .	7
2.5. Bainita . . . . .	8
2.5.1. Microestructura . . . . .	9
2.5.2. Cinética de Transformación . . . . .	12
2.5.3. Propiedades Mecánicas . . . . .	19
2.5.4. Efecto del revenido . . . . .	21
2.5.5. Elementos aleantes . . . . .	21

2.6.	Martensita . . . . .	22
2.6.1.	Microestructura . . . . .	22
2.6.2.	Martensita revenida y propiedades mecánicas . . . . .	23
2.7.	Mezcla bainita-martensita . . . . .	28
2.7.1.	Características metalográficas . . . . .	29
2.7.2.	Propiedades mecánicas . . . . .	29
2.8.	Tenacidad en aceros revenidos de alta resistencia . . . . .	32
2.9.	Velocidad de enfriamiento . . . . .	36
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>39</b>
3.1.	Diseño del método . . . . .	39
3.1.1.	Constantes . . . . .	39
3.1.2.	Variables . . . . .	39
3.1.3.	Resultados . . . . .	39
3.2.	Método . . . . .	40
<b>4.</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>41</b>
4.1.	Software empleado . . . . .	41
4.2.	Relaciones dureza-fluencia . . . . .	42
4.2.1.	Dureza-fluencia en aceros bainíticos . . . . .	42
4.2.2.	Dureza-fluencia en aceros martensíticos . . . . .	43
4.3.	Desarrollo de la metodología . . . . .	45
4.3.1.	Dureza en aceros martensíticos . . . . .	45
4.3.2.	Dureza en aceros bainíticos . . . . .	45

4.3.3.	Tenacidad . . . . .	47
4.4.	Validaciones . . . . .	48
4.4.1.	Tamaño de grano austenítico . . . . .	48
4.4.2.	Curvas TTT . . . . .	50
4.4.3.	Dureza martensita . . . . .	57
4.4.4.	Microestructura en aceros bainíticos . . . . .	60
4.5.	Modelo final para obtener propiedades mecánicas en aceros revenidos mezcla bainita- martensita . . . . .	65
4.5.1.	Método . . . . .	65
4.5.2.	Relación resistencia a la fluencia y dureza . . . . .	67
4.5.3.	Relación tenacidad . . . . .	71
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>74</b>
5.1.	Curva de enfriamiento . . . . .	74
5.2.	Obtención de Aceros . . . . .	76
5.2.1.	Estrategia . . . . .	76
5.2.2.	Parámetros fijos . . . . .	77
5.2.3.	Efecto de los elementos aleantes en las curvas de formación de fases fer- rítica perlítica . . . . .	77
5.3.	Definición de Aceros . . . . .	82
5.4.	Análisis de Resultados . . . . .	94
5.5.	Limitaciones del Modelo . . . . .	96
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>98</b>

<b>Bibliografía</b>	<b>100</b>
<b>A. Cinética de la molienda SAG y su empleo en Chile</b>	<b>105</b>
<b>B. Cargas y predicción de daño en lifters</b>	<b>107</b>
<b>C. Aporte (<math>\Delta HV</math>) en aceros martensíticos revenidos</b>	<b>111</b>
<b>D. Diagramas TTT, Atlas Transformación Isotérmica [57]</b>	<b>117</b>
<b>E. Diagramas TTT de los aceros definidos</b>	<b>121</b>

# Índice de tablas

2.1. Comparación propiedades mecánicas de diversos aceros bainíticos y perlíticos (a) bainíticos, (b) perlíticos [2] . . . . .	6
2.2. Composición química de los aceros experimentales empleados [19] . . . . .	8
2.3. Constantes empleadas para la obtención de $V_B$ como función del tiempo . . . . .	18
2.4. Contribución del carbono y de cada elemento aleante según su composición en un acero revenido a 1000°F, (El valor por contribución por fósforo no aparece en la figura C.7, sin embargo si aparece en el trabajo original) . . . . .	26
2.5. Parámetros metalográficos de una estructura mixta compuesta por martensita y bainita inferior [58] . . . . .	29
2.6. Ecuaciones a emplear para la obtención de $\sigma_{0,2}^{Mix}$ . . . . .	32
4.1. Valores máximos y mínimos empleados que pueden ser ingresados en el software .	42
4.2. Relación entre dureza y fluencia en aceros bainíticos a partir de diferentes trabajos .	43
4.3. Propiedades mecánicas de los aceros obtenidos por Lee y Su [47] a distintas temperaturas y tiempo de revenido . . . . .	44
4.4. Comparación de diversos tamaños de granos austeníticos obtenidos experimentalmente y predichos con el modelo . . . . .	49
4.5. Composición química del acero i . . . . .	50
4.6. Composición química del acero ii . . . . .	51
4.7. Composición química del acero iii . . . . .	52

4.8. Composición química del acero iv . . . . .	53
4.9. Composición química del acero v . . . . .	54
4.10. Composición química del acero vi . . . . .	54
4.11. Composición química del acero vii . . . . .	55
4.12. Composición química del acero empleado en el trabajo de Lee y Su [47] . . . . .	57
4.13. Comparación de los resultados para la dureza en el trabajo de Lee y Su obtenidos experimentalmente y según el método . . . . .	58
4.14. Composición química de los aceros empleados en el trabajo de Singh y Bhadeshia [32] . . . . .	60
4.15. Resultados obtenidos experimentalmente y mediante ecuación 2.5 . . . . .	60
4.16. Fracciones volumétricas en distintos aceros a diferentes temperaturas de transformación . . . . .	61
4.17. Variación de $S_M$ con respecto a $V_B$ en el experimento de [58] . . . . .	68
4.18. Valores estimados para cada contribución en $\sigma_y^{Mix}$ con respecto a $V_B$ . . . . .	69
4.19. Ecuaciones a emplear para la obtención de $H_{mix}$ . . . . .	71
4.20. Valores estimados de $S_M$ con respecto a $V_B$ . . . . .	72
5.1. Propiedades y características de la placa de acero considerada para el análisis . . . . .	75
5.2. Composición química de los aceros definidos . . . . .	83
5.3. Características microestructurales de los aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	86
5.4. Propiedades mecánicas de los aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	87
5.5. Características microestructurales de los aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	87
5.6. Propiedades mecánicas de los aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	87
5.7. Composición química de los nuevos aceros definidos . . . . .	88

5.8. Características microestructurales de los nuevos aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	89
5.9. Propiedades mecánicas de los nuevos aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	89
5.10. Características microestructurales de los nuevos aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	89
5.11. Propiedades mecánicas de los nuevos aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	89
5.12. Composición química de los nuevos aceros definidos . . . . .	91
5.13. Características microestructurales de los nuevos aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	91
5.14. Propiedades mecánicas de los nuevos aceros definidos, en la zona de la superficie . . . . .	91
5.15. Características microestructurales de los nuevos aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	91
5.16. Propiedades mecánicas de los nuevos aceros definidos, en la zona del interior . . . . .	92
5.17. Valores máximos y mínimos empleados que pueden ser ingresados en el software . . . . .	96
A.1. Molinos SAG empleados en Chile en las faenas mineras, con sus respectivas dimensiones y capacidades . . . . .	106
B.1. Parámetros del Molino SAG simulado mediante DEM . . . . .	107

# Índice de figuras

2.1. Molino SAG de 11 metros de diámetro por 4.6 metros de largo (Planta SAG, Codelco División Andina) [1] . . . . .	3
2.2. Distribución de los revestimientos al interior de los molinos [1] . . . . .	4
2.3. Revestimientos de los molinos SAG y sus componentes [1] . . . . .	4
2.4. Relación entre microestructura y resistencia al desgaste en aceros [6] . . . . .	6
2.5. Ilustración esquemática de la microestructura de la bainita superior e inferior [8] . .	9
2.6. Evolución en el tiempo de una pluma bainítica [8] . . . . .	10
2.7. Micrografía por transmisión de electrones de una pluma bainítica; (a) micrografía óptica; (b,c) micrografía de campo claro de transmisión de electrones; imagen de campo oscuro de austenita retenida; (d) montaje que muestra la estructura de una pluma (esta pluma se vería como una única placa oscura en microscopía óptica) [8]	10
2.8. Ilustración de la construcción de la curva $T'_0$ [8] . . . . .	13
2.9. Ilustración del concepto de la expansión del volumen, dos partículas nucleon juntas y crecen a un volumen finito en un tiempo $t$ . Nuevas regiones $c$ y $d$ son formadas debido al crecimiento original de las partículas, pero $a$ y $b$ son nuevas partículas de las cuales $b$ no contribuye al incremento del volumen de la bainita [8] . . . . .	15
2.10. Típicos contribución por solución sólida por porcentaje peso de soluto en ferrita, el esfuerzo intrínseco del Fe está incluido [34] . . . . .	20
2.11. Efecto del contenido de carbono en $M_S$ y la forma de la martensita en aceros al carbono [13] . . . . .	22

2.12. Tamaño de austenita v/s tamaño de las agujas de martensita obtenidas bajo diversos tratamientos térmicos [31] . . . . .	23
2.13. Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas de un acero del tipo 4340 [14] . . . . .	24
2.14. Efecto del carbono en la dureza de la martensita revenida a distintas temperaturas en aceros Fe-C. Cópia construida por el alumno del correspondiente gráfico obtenido en el trabajo de Grange et al. [43] . . . . .	26
2.15. Efecto de $V_B$ en la resistencia . . . . .	30
2.16. Comparación de los valores experimentales de $\sigma_{0,2}^{Mix}$ , con respecto a la ecuación 2.38 (eq(3) en el gráfico) y 2.39 (eq(4) en el gráfico) . . . . .	31
2.17. $\sigma_f$ como función del tamaño de grano (en negro en el trabajo de Schino et al. [51], y en blanco en el trabajo de Brozzo [50]) . . . . .	34
2.18. Energía absorbida en el impacto, esfuerzo de rotura en el impacto y deformación medidas a distintas temperaturas para un acero $V_B$ de 25 y 100 %, según el trabajo de Tomita y Okabayashi [58] . . . . .	35
2.19. CVN (Energía de impacto en un ensayo Charpy) obtenida en el acero de Tomita y Okabayashi [58], con respecto a la fracción volumétrica de bainita . . . . .	36
2.20. Temperatura en la superficie como función del tiempo, para una placa de espesor 2L	37
2.21. Distribución de temperaturas para diferentes $B_i$ , a distintas distancias de la superficie	38
4.1. Curvas C para la obtención de diagramas TTT. Elaboración propia empleando el software de Bhadeshia para un acero con una composición Fe-0.32 %C-1.45 %Si-1.97 %Mn-0.264 %Mo-1.26 %Cr-0.1 %V . . . . .	42
4.2. dureza v/s fluencia según los datos de tabla 4.2 . . . . .	43
4.3. dureza v/s $S_{ys}$ obtenido en el trabajo de Lee y Su, después de la correspondiente conversión de dureza Vickers a Brinell [47] . . . . .	44
4.4. Modelo construido para la obtención de la dureza en aceros bainíticos a partir de diversas referencias bibliográficas . . . . .	46

4.5. Comparación del tamaño de grano austenítico calculado con respecto al obtenido experimentalmente . . . . .	48
4.6. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero i . . . . .	50
4.7. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero ii . . . . .	51
4.8. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero iii . . . . .	52
4.9. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero iv . . . . .	53
4.10. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero v . . . . .	54
4.11. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero vi . . . . .	55
4.12. Comparación entre curvas TTT obtenidas mediante el modelo propuesto y según atlas de transformaciones isotérmicas [57] para acero vii . . . . .	56
4.13. Comparación de la dureza para un acero AISI 4340 obtenida experimentalmente [47] y mediante el método para un tiempo de revenido de 2 horas . . . . .	58
4.14. Comparación de la dureza para un acero AISI 4340 obtenida experimentalmente [47] y mediante el método para un tiempo de revenido de 48 horas . . . . .	59
4.15. Evolución en el tiempo de la fracción volumétrica de la bainita a diferentes temperaturas de transformación (expresadas en [K]) obtenidas experimentalmente [26]	62
4.16. Evolución en el tiempo de la fracción volumétrica de la bainita a diferentes temperaturas de transformación (expresadas en [°C]) obtenidas mediante el modelo (ver Sección 2.5.2) . . . . .	62
4.17. Evolución en el tiempo de la fracción volumétrica de la bainita a diferentes temperaturas de transformación obtenidas experimentalmente [32] . . . . .	63

4.18. Evolución en el tiempo de la fracción volumétrica de la bainita a diferentes temperaturas de transformación (expresadas en [°C]) obtenidas mediante el modelo (ver Sección 2.5.2) . . . . .	63
4.19. Diagrama de transformación isotérmica para un acero de composición 0,38 %C-1,29 %Si-1,73 %Mn, mediante elaboración propia en base a los métodos propuestos, la primera curva <i>C</i> representa la nucleación, hacia la derecha incrementos de 5 % hasta llegar a la curva para 50 %. . . . .	64
4.20. Modelo corregido para la obtención de la dureza en aceros bainíticos-martensíticos	65
4.21. Comparación de los resultados obtenidos en el trabajo de Tomita y Okabayashi, a la izquierda los resultados experimentales, a la derecha el obtenido mediante el presente modelo . . . . .	67
4.22. Variación de $S_M$ con respecto a $V_B$ en el trabajo de Tomita y Okabayashi . . . . .	68
4.23. Variación de $\sigma_y^M$ (en [MPa]) con respecto a $S_M^{-1/2}$ ( $S_M$ en [ $\mu\text{m}$ ]) en el trabajo de Tomita y Okabayashi . . . . .	70
4.24. CVN obtenido mediante ecuación 4.8 con respecto a $V_B$ . . . . .	73
5.1. Dimensiones empleadas en el modelo de enfriamiento de placa de desgaste, para estimar curva de enfriamiento en la superficie y en el interior . . . . .	75
5.2. Curvas de enfriamiento continuo por aire, de acuerdo a los parámetros dados en la tabla 5.1 . . . . .	76
5.3. Efecto del Cr en la curvas de inicio de formación de las fases difusionales (ferrita-perlita) y adifusionales (bainita) . . . . .	78
5.4. Efecto del Mo en la curvas de inicio de formación de las fases difusionales (ferrita-perlita) y adifusionales (bainita) . . . . .	79
5.5. Efecto del Mn en la curvas de inicio de formación de las fases difusionales (ferrita-perlita) y adifusionales (bainita) . . . . .	80
5.6. Efecto del Ni en la curvas de inicio de formación de las fases difusionales (ferrita-perlita) y adifusionales (bainita) . . . . .	81

5.7. Efecto combinado del Cr y Mo en la curvas de inicio de formación de las fases difusionales (ferrita-perlita) y adifusionales (bainita) . . . . .	82
5.8. Curvas de inicio de las fases difusionales (ferrita-perlita) de los diferentes acers definidos . . . . .	83
5.9. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 1 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	84
5.10. Relación dureza-tenacidad obtenida para los aceros definidos en 5.2, en la zona de la superficie luego del revenido . . . . .	88
5.11. Relación dureza-tenacidad obtenida para los aceros indicados en el gráfico, en la zona de la superficie luego del revenido . . . . .	90
5.12. Relación dureza-tenacidad obtenida para los aceros indicados en el gráfico, en la zona de la superficie luego del revenido . . . . .	92
5.13. Relación dureza-tenacidad obtenida para los aceros indicados en el gráfico, en la zona de la superficie luego del revenido . . . . .	93
5.14. Relación dureza-tenacidad obtenida para los aceros indicados en el gráfico, en la zona del interior luego del revenido . . . . .	93
A.1. Características del movimiento de riñón de carga [1] . . . . .	105
B.1. Distribución de los esfuerzos normal (a) y de corte (b), daño por impacto (c) y por abrasión (d). En todos los casos el color rojo representa magnitudes altas, verde moderadas y azul baja . . . . .	108
B.2. Distribución del trabajo del esfuerzo en el sentido normal y predicción del daño por impacto, la primera separación muestra la cara frontal del lifter, la segunda la cara superior, la tercera la cara posterior y la ultima la base del liner (placa) . . . . .	108
B.3. Distribución del trabajo de corte y la predicción del daño por abrasión, la primera separación muestra la cara frontal del lifter, la segunda la cara superior, la tercera la cara posterior y la ultima la base del liner (placa) . . . . .	109

C.1. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 400 [°F] por una hora . . . . .	111
C.2. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 500 [°F] por una hora . . . . .	112
C.3. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 600 [°F] por una hora . . . . .	112
C.4. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 700 [°F] por una hora . . . . .	113
C.5. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 800 [°F] por una hora . . . . .	113
C.6. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 900 [°F] por una hora . . . . .	114
C.7. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 1000 [°F] por una hora . . . . .	114
C.8. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 1100 [°F] por una hora . . . . .	115
C.9. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 1200 [°F] por una hora . . . . .	115
C.10. Efecto de los elementos en la dureza en la dureza de la martensita revenida a 1300 [°F] por una hora . . . . .	116
D.1. Diagrama TTT para acero i según [57] . . . . .	117
D.2. Diagrama TTT para acero ii según [57] . . . . .	118
D.3. Diagrama TTT para acero iii según [57] . . . . .	118
D.4. Diagrama TTT para acero iv según [57] . . . . .	119
D.5. Diagrama TTT para acero v según [57] . . . . .	119
D.6. Diagrama TTT para acero vi según [57] . . . . .	120

D.7. Diagrama TTT para acero vii según [57] . . . . .	120
E.1. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 1 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	121
E.2. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 2 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	122
E.3. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 3 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	122
E.4. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 4 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	123
E.5. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 5 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	123
E.6. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 6 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	124
E.7. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 7 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	124
E.8. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 8 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	125
E.9. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 9 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	125
E.10. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 10 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	126
E.11. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 11 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	126
E.12. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 12 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	127
E.13. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 13 y curvas de enfriamiento continuo . . . . .	127

E.14. Curva TTT enfocado en la transformación bainítica para Acero 14 y curvas de enfriamiento continuo . . . . . 128