



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE ENXEÑERÍA INDUSTRIAL II

Tesis doctoral

Estudio de aleaciones férreas austeníticas de bajo manganeso resistentes al desgaste.

Autor

Benito del Río López

Director

Ana Isabel García Díez

Ferrol, 2013

I. TABLA DE CONTENIDOS

I. TABLA DE CONTENIDOS	I
II. RESUMEN	XI
III. RESUMO	XII
IV. ABSTRACT	XIII
1. OBJETIVOS DE LA TESIS. FASES DE LA INVESTIGACIÓN.	1
1.1. <i>Objetivos de la tesis.</i>	1
1.2. <i>Fases de la investigación.</i>	4
2. ALEACIONES FÉRREAS DE MOLDEO RESISTENTES AL DESGASTE.	5
2.1. <i>Mecanismos fundamentales de desgaste.</i>	5
2.2. <i>Aleaciones férricas de moldeo resistentes al desgaste</i>	9
2.2.1. Aceros al manganeso.....	10
2.2.2. Aceros de construcción al carbono.	12
2.2.3. Aceros perlíticos al cromo molibdeno	14
2.2.4. Aceros templados y revenidos.....	15
2.2.5. Fundiciones aleadas al cromo.	16
2.3. <i>Ensayos de resistencia al desgaste.</i>	18
2.3.1. Ensayos de abrasión severa o por arranque de material.	19
2.3.2. Ensayo de abrasión en arena húmeda.....	21
2.3.3. Ensayo abrasivo a dos cuerpos.....	23
2.3.4. Ensayos de rueda de caucho.....	25
2.3.5. Correlación de los ensayos de laboratorio con aplicaciones reales.	27
2.3.6. Aplicación práctica de los principios de resistencia desgaste.	30
2.4. <i>Aceros austeníticos al manganeso.</i>	33
2.4.1. Características generales	33
2.4.2. Endurecimiento por deformación.....	36
2.4.3. Elementos de aleación	38
2.4.4. Aceros austeníticos de bajo y medio manganeso	41
3. MÉTODO EXPERIMENTAL.	44

3.1. Moldeo y colada de probetas.....	44
3.2. Preparación y ensayo de las probetas.....	47
3.3. Análisis químico de las coladas.....	49
3.4. Tratamiento térmico del acero.....	50
3.5. Pruebas en servicio.....	53
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	54
4.1. Análisis químico de las coladas.....	54
4.2. Durezas en estado tratado.....	55
4.3. Observación de las micrografías.....	58
4.4. Selección de las composiciones a ensayar en servicio.....	60
4.5. Resistencia al desgaste en servicio.....	61
4.5.1. Contraste de hipótesis con desigualdad de varianzas.....	63
4.5.2. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada.....	66
4.5.3. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada sin atípicos de colada 0.....	71
4.5.4. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada sin atípicos de las coladas 0 y 2.....	74
4.5.5. ANOVA Velocidad relativa/Colada.....	76
4.5.6. ANOVA Velocidad de desgaste / Ensayo.....	80
4.5.7. ANOVA Velocidad relativa/Ensayo.....	83
4.5.8. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada y Ensayo.....	86
4.5.9. ANOVA Velocidad de desgaste / Molino.....	89
4.5.10. ANOVA Velocidad de desgaste / Molino, Ensayo y Colada.....	92
4.5.11. ANOVA Velocidad relativa / Molino, Ensayo y Colada.....	95
4.5.12. ANOVA Velocidad relativa / Molino, Ensayo y Colada para las coladas 1 y 2.....	98
4.5.13. ANOVA Velocidad relativa / Tiempo medio y Colada para las coladas 1 y 2.....	102
4.5.14. Análisis de regresión de la colada 1.....	106
4.5.15. Análisis de regresión de la colada 2.....	111
4.5.16. Análisis de regresión de la colada 0.....	114
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	115
6. DESARROLLO FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN.....	116
7. BIBLIOGRAFÍA.....	117
ANEXO I. DUREZAS TRAS TRATAMIENTO TÉRMICO.....	121
Durezas por tratamiento.....	122

Estado 1: Bruto de colada	122
Estado 2: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en agua.....	122
Estado 3: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire	123
Estado 4: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 100°C /2h y enfriamiento en aire.....	123
Estado 5: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 150°C /2h y enfriamiento en aire.....	124
Estado 6: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 200°C /2h y enfriamiento en aire.....	124
Estado 7: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 250°C /2h y enfriamiento en aire.....	125
Estado 8: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 300°C /2h y enfriamiento en aire.....	125
Estado 9: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 350°C /2h y enfriamiento en aire.....	126
Estado 10: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 400°C /2h y enfriamiento en aire.....	126
Estado 11: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 450°C /2h y enfriamiento en aire.....	127
Estado 12: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 500°C /2h y enfriamiento en aire.....	127
Estado 13: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 550°C /2h y enfriamiento en aire.....	128
Estado 14: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 600°C /2h y enfriamiento en aire.....	128
Estado 15: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 650°C /2h y enfriamiento en aire.....	129
Estado 16: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 700°C /2h y enfriamiento en aire.....	129
Estado 17: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 750°C /2h y enfriamiento en aire.....	130
Estado 18: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 800°C /2h y enfriamiento en aire.....	130
Estado 19: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 850°C /2h y enfriamiento en aire.....	131
Estado 20: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire. Recocido a 900°C /2h y enfriamiento en aire.....	131
<i>Durezas por colada</i>	132
Colada 1	132

Colada 2	133
Colada 3	134
Colada 4	135
Colada 5	136
Colada 6	137
Colada 7	138
Colada 8	139
Colada 9	140
Colada 10	141
ANEXO II. PROBETAS TRATADAS.....	142
<i>Observaciones generales</i>	<i>142</i>
<i>Probeta 1.1. Colada 1 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>143</i>
<i>Probeta 1.2. Colada 1 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>144</i>
<i>Probeta 1.3. Colada 1 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>145</i>
<i>Probeta 1.4. Colada 1 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>146</i>
<i>Probeta 1.5. Colada 1 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>147</i>
<i>Probeta 1.6. Colada 1 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>148</i>
<i>Probeta 1.7. Colada 1 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>149</i>
<i>Probeta 1.8. Colada 1 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>150</i>
<i>Probeta 1.9. Colada 1 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>151</i>
<i>Probeta 1.10. Colada 1 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>152</i>
<i>Probeta 1.11. Colada 1 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>153</i>
<i>Probeta 1.12. Colada 1 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>154</i>
<i>Probeta 1.13. Colada 1 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>155</i>
<i>Probeta 1.14. Colada 1 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>156</i>
<i>Probeta 1.15. Colada 1 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>157</i>
<i>Probeta 1.16. Colada 1 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>158</i>
<i>Probeta 1.17. Colada 1 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>159</i>
<i>Probeta 2.1. Colada 2 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>160</i>
<i>Probeta 2.2. Colada 2 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>161</i>
<i>Probeta 2.3. Colada 2 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>162</i>

<i>Probeta 2.4. Colada 2 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>163</i>
<i>Probeta 2.5. Colada 2 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>164</i>
<i>Probeta 2.6. Colada 2 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>165</i>
<i>Probeta 2.7. Colada 2 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>166</i>
<i>Probeta 2.8. Colada 2 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>167</i>
<i>Probeta 2.9. Colada 2 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>168</i>
<i>Probeta 2.10. Colada 2 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>169</i>
<i>Probeta 2.11. Colada 2 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>170</i>
<i>Probeta 2.12. Colada 2 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>171</i>
<i>Probeta 2.13. Colada 2 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>172</i>
<i>Probeta 2.14. Colada 2 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>173</i>
<i>Probeta 2.15. Colada 2 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>174</i>
<i>Probeta 2.16. Colada 2 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>175</i>
<i>Probeta 2.17. Colada 2 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>176</i>
<i>Probeta 3.1. Colada 3 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>177</i>
<i>Probeta 3.2. Colada 3 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>178</i>
<i>Probeta 3.3. Colada 3 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>179</i>
<i>Probeta 3.4. Colada 3 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>180</i>
<i>Probeta 3.5. Colada 3 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>181</i>
<i>Probeta 3.6. Colada 3 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>182</i>
<i>Probeta 3.7. Colada 3 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>183</i>
<i>Probeta 3.8. Colada 3 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>184</i>
<i>Probeta 3.9. Colada 3 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>185</i>
<i>Probeta 3.10. Colada 3 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>186</i>
<i>Probeta 3.11. Colada 3 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>187</i>
<i>Probeta 3.12. Colada 3 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>188</i>
<i>Probeta 3.13. Colada 3 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>189</i>
<i>Probeta 3.14. Colada 3 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>190</i>
<i>Probeta 3.15. Colada 3 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>191</i>

<i>Probeta 3.16. Colada 3 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>192</i>
<i>Probeta 3.17. Colada 3 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>193</i>
<i>Probeta 4.1. Colada 4 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>194</i>
<i>Probeta 4.2. Colada 4 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>195</i>
<i>Probeta 4.3. Colada 4 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>197</i>
<i>Probeta 4.4. Colada 4 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>198</i>
<i>Probeta 4.5. Colada 4 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>199</i>
<i>Probeta 4.6. Colada 4 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>200</i>
<i>Probeta 4.7. Colada 4 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>201</i>
<i>Probeta 4.8. Colada 4 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>202</i>
<i>Probeta 4.9. Colada 4 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>203</i>
<i>Probeta 4.10. Colada 4 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>204</i>
<i>Probeta 4.11. Colada 4 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>205</i>
<i>Probeta 4.12. Colada 4 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>206</i>
<i>Probeta 4.13. Colada 4 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>207</i>
<i>Probeta 4.14. Colada 4 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>208</i>
<i>Probeta 4.15. Colada 4 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>209</i>
<i>Probeta 4.16. Colada 4 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>210</i>
<i>Probeta 4.17. Colada 4 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>211</i>
<i>Probeta 5.1. Colada 5 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>212</i>
<i>Probeta 5.2. Colada 5 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>213</i>
<i>Probeta 5.3. Colada 5 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>214</i>
<i>Probeta 5.4. Colada 5 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>215</i>
<i>Probeta 5.5. Colada 5 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>216</i>
<i>Probeta 5.6. Colada 5 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>217</i>
<i>Probeta 5.7. Colada 5 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>218</i>
<i>Probeta 5.8. Colada 5 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>219</i>
<i>Probeta 5.9. Colada 5 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>220</i>
<i>Probeta 5.10. Colada 5 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>221</i>

<i>Probeta 5.11. Colada 5 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>222</i>
<i>Probeta 5.12. Colada 5 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>223</i>
<i>Probeta 5.13. Colada 5 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>224</i>
<i>Probeta 5.14. Colada 5 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>225</i>
<i>Probeta 5.15. Colada 5 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>226</i>
<i>Probeta 5.16. Colada 5 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>227</i>
<i>Probeta 5.17. Colada 5 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>228</i>
<i>Probeta 6.1. Colada 6 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>229</i>
<i>Probeta 6.2. Colada 6 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>230</i>
<i>Probeta 6.3. Colada 6 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>231</i>
<i>Probeta 6.4. Colada 6 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>232</i>
<i>Probeta 6.5. Colada 6 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>233</i>
<i>Probeta 6.6. Colada 6 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>234</i>
<i>Probeta 6.7. Colada 6 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>235</i>
<i>Probeta 6.8. Colada 6 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>236</i>
<i>Probeta 6.9. Colada 6 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>237</i>
<i>Probeta 6.10. Colada 6 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>238</i>
<i>Probeta 6.11. Colada 6 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>239</i>
<i>Probeta 6.12. Colada 6 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>240</i>
<i>Probeta 6.13. Colada 6 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>241</i>
<i>Probeta 6.14. Colada 6 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>242</i>
<i>Probeta 6.15. Colada 6 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>243</i>
<i>Probeta 6.16. Colada 6 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>244</i>
<i>Probeta 6.17. Colada 6 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>245</i>
<i>Probeta 7.1. Colada 7 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>246</i>
<i>Probeta 7.2. Colada 7 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>247</i>
<i>Probeta 7.3. Colada 7 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>248</i>
<i>Probeta 7.4. Colada 7 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>249</i>
<i>Probeta 7.5. Colada 7 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>250</i>

<i>Probeta 7.6. Colada 7 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>251</i>
<i>Probeta 7.7. Colada 7 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>252</i>
<i>Probeta 7.8. Colada 7 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>253</i>
<i>Probeta 7.9. Colada 7 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>254</i>
<i>Probeta 7.10. Colada 7 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>255</i>
<i>Probeta 7.11. Colada 7 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>256</i>
<i>Probeta 7.12. Colada 7 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>257</i>
<i>Probeta 7.13. Colada 7 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>258</i>
<i>Probeta 7.14. Colada 7 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>259</i>
<i>Probeta 7.15. Colada 7 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>260</i>
<i>Probeta 7.16. Colada 7 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>261</i>
<i>Probeta 7.17. Colada 7 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>262</i>
<i>Probeta 8.1. Colada 8 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>263</i>
<i>Probeta 8.2. Colada 8 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>264</i>
<i>Probeta 8.3. Colada 8 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>265</i>
<i>Probeta 8.4. Colada 8 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>266</i>
<i>Probeta 8.5. Colada 8 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>267</i>
<i>Probeta 8.6. Colada 8 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>268</i>
<i>Probeta 8.7. Colada 8 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>269</i>
<i>Probeta 8.8. Colada 8 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>270</i>
<i>Probeta 8.9. Colada 8 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>271</i>
<i>Probeta 8.10. Colada 8 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>272</i>
<i>Probeta 8.11. Colada 8 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>273</i>
<i>Probeta 8.12. Colada 8 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>274</i>
<i>Probeta 8.13. Colada 8 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>275</i>
<i>Probeta 8.14. Colada 8 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>276</i>
<i>Probeta 8.15. Colada 8 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>277</i>
<i>Probeta 8.16. Colada 8 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>278</i>
<i>Probeta 8.17. Colada 8 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>279</i>

<i>Probeta 9.1. Colada 9 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>280</i>
<i>Probeta 9.2. Colada 9 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>281</i>
<i>Probeta 9.3. Colada 9 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>282</i>
<i>Probeta 9.4. Colada 9 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>283</i>
<i>Probeta 9.5. Colada 9 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>284</i>
<i>Probeta 9.6. Colada 9 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>285</i>
<i>Probeta 9.7. Colada 9 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>286</i>
<i>Probeta 9.8. Colada 9 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>287</i>
<i>Probeta 9.9. Colada 9 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>288</i>
<i>Probeta 9.10. Colada 9 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>289</i>
<i>Probeta 9.11. Colada 9 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>290</i>
<i>Probeta 9.12. Colada 9 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>291</i>
<i>Probeta 9.13. Colada 9 Tratamiento a 700°C.....</i>	<i>292</i>
<i>Probeta 9.14. Colada 8 Tratamiento a 750°C.....</i>	<i>293</i>
<i>Probeta 9.15. Colada 9 Tratamiento a 800°C.....</i>	<i>294</i>
<i>Probeta 9.16. Colada 9 Tratamiento a 850°C.....</i>	<i>295</i>
<i>Probeta 9.17. Colada 9 Tratamiento a 900°C.....</i>	<i>296</i>
<i>Probeta 10.1. Colada 10 Tratamiento a 100°C.....</i>	<i>297</i>
<i>Probeta 10.2. Colada 10 Tratamiento a 150°C.....</i>	<i>298</i>
<i>Probeta 10.3. Colada 10 Tratamiento a 200°C.....</i>	<i>299</i>
<i>Probeta 10.4. Colada 10 Tratamiento a 250°C.....</i>	<i>300</i>
<i>Probeta 10.5. Colada 10 Tratamiento a 300°C.....</i>	<i>301</i>
<i>Probeta 10.6. Colada 10 Tratamiento a 350°C.....</i>	<i>302</i>
<i>Probeta 10.7. Colada 10 Tratamiento a 400°C.....</i>	<i>303</i>
<i>Probeta 10.8. Colada 10 Tratamiento a 450°C.....</i>	<i>304</i>
<i>Probeta 10.9. Colada 10 Tratamiento a 500°C.....</i>	<i>305</i>
<i>Probeta 10.10. Colada 10 Tratamiento a 550°C.....</i>	<i>306</i>
<i>Probeta 10.11. Colada 10 Tratamiento a 600°C.....</i>	<i>307</i>
<i>Probeta 10.12. Colada 10 Tratamiento a 650°C.....</i>	<i>308</i>

<i>Probeta 10.13. Colada 10 Tratamiento a 700°C.</i>	309
<i>Probeta 10.14. Colada 10 Tratamiento a 750°C.</i>	310
<i>Probeta 10.15. Colada 10 Tratamiento a 800°C.</i>	311
<i>Probeta 10.16. Colada 10 Tratamiento a 850°C.</i>	312
<i>Probeta 10.17. Colada 10 Tratamiento a 900°C.</i>	313
Anexo III Fotografías de las cuñas.	314
<i>Cuñas colada 0</i>	314
<i>Cuñas colada 1</i>	322
<i>Cuñas colada 2</i>	330

II. RESUMEN

Se han realizado diez coladas de aceros austeníticos de bajo manganeso con composiciones variables en carbono, manganeso, cromo, cobre y molibdeno. Se les sometió a recocidos de solubilización con permanencias posteriores a temperaturas variables entre 100 y 900 grados Celsius. Se caracterizaron metalográficamente y se tomó dureza en cada estado.

De estas diez aleaciones se eligieron dos para la fabricación de cuñas para molinos de bolas en centrales térmicas de carbón en base a criterios de dureza y estabilidad térmica. Se instalaron estas cuñas junto con las cuñas habituales de acero tratado de baja aleación como referencia en tres molinos durante una campaña de una central. Se realizaron pesadas de las cuñas al comienzo, al voltearlas y al final de la campaña. Se evaluaron, por métodos estadísticos, tanto la velocidad de desgaste como la evolución del mismo a lo largo del tiempo. Se determinó que los aceros austeníticos de bajo manganeso pueden sustituir con ventaja a los aceros tratados de baja aleación en aplicaciones de desgaste sin presión.

III. RESUMO

Realizáronse dez coadas de aceiros austeníticos de baixo manganeso con composicións variables en carbono, manganeso, cromo, cobre e molibdeno. Sometéuselles a recocidos de solubilización con permanencias posteriores a temperaturas variables entre 100 e 900 graos Celsius. Caracterizáronse metalográficamente e tomouse dureza en cada estado.

Destas dez aliaxes elixíronse dous para a fabricación de cuñas para muíños de bolas en centrais térmicas de carbón sobre a base de criterios de dureza e estabilidade térmica. Instaláronse estas cuñas xunto coas cuñas habituais de aceiro tratado de baixa aliaxe como referencia en tres muíños durante unha campaña dunha central. Realizáronse pesadas das cuñas ao comezo, ao voltealas e ao final da campaña. Avaliáronse, por métodos estatísticos, tanto a velocidade de desgaste coma a evolución deste ao longo do tempo. Determinouse que os aceiros austeníticos de baixo manganeso poden substituír con vantaxe aos aceiros tratados de baixa aliaxe en aplicacións de desgaste sen presión.

IV. ABSTRACT

Ten castings were made of low manganese austenitic steels with different compositions of carbon, manganese, chromium, copper and molybdenum. They were solution annealed and treated at temperatures between 100 and 900°C. They were characterized metallographically and hardness was measured in each state.

Two of these ten alloys were selected to produce wedges for ball mills in coal power plants, based on criteria of strength and thermal stability. These wedges were installed along with the usual low alloy heat treated steel wedges as reference in three mills during a campaign of the plant. They were weighted at the beginning, in the pause to flip them and at the end of the campaign. They were evaluated by statistical methods in order to determinate the wear rate and its evolution over time. It was concluded that the low manganese austenitic steels can advantageously replace low alloy heat treated steel in wear situations without pressure uses.

1. OBJETIVOS DE LA TESIS. FASES DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. Objetivos de la tesis.

Es bien conocida la importancia que tienen las aleaciones resistentes al desgaste en la industria actual, sean cuales sean las solicitaciones puestas en juego: abrasión, erosión, golpe o choque, tensión mecánica, temperatura, etc.

Es evidente que se han desarrollado numerosas aleaciones de diferentes bases para dar respuesta técnica y económica a las variadas problemáticas planteadas, sin duda, las aleaciones férricas son en la mayoría de las ocasiones la solución más idónea tanto por el bajo precio que presentan, como por su buen comportamiento, sin olvidar el gran abanico de aleaciones comerciales existentes, su facilidad de aprovisionamiento y la diversidad de morfologías posibles: chapas, redondos, tubos, perfiles, etc., todo ello posibilitado por la facilidad de conformado de dichas aleaciones.

En esta tesis se aborda el estudio de un tipo de aceros, los aceros austeníticos de bajo manganeso derivados del conocido acero Hadfield, que despertaron hace algunos años interés como alternativa en cierto tipo de aplicaciones a temperaturas bajas o medias y que, sin embargo, no han pasado de una fase preliminar de estudio casi exclusivamente bibliográfico. De hecho la Climax Molybdenum Co. fue la empresa que primeramente publicó estudios sobre este tipo de aleaciones, que no pasaron de la aleación 6Mn-1Mo.

Parece ser que, según la Climax, este acero austenítico de bajo manganeso con molibdeno, podía cubrir el vacío existente entre los aceros perlíticos y los martensíticos con ventajas evidentes sobre ambos. Debe insistirse en las escasas referencias bibliográficas existentes y en el desinterés de la Climax en proseguir los estudios.

No obstante, se intuía muy interesante el desarrollo de estas aleaciones para ciertas aplicaciones en las que ni el clásico acero Hadfield de 14% Mn, ni los aceros perlíticos o los martensíticos, ofrecían respuesta satisfactoria, y más cuando se trataba de servicio a temperaturas entre los 100 y los 400°C con solicitaciones de choque y abrasión.

En dichas condiciones los aceros perlíticos sufren desgastes acelerados y los aceros martensíticos se agrietan inutilizándose.

Los aceros Hadfield presentan comportamientos muy deficientes en condiciones exclusivamente abrasivas, y con la temperatura se fragilizan por precipitación de carburos y otros constituyentes frágiles.

Es obvio que ningún tipo de fundición puede en dichas conclusiones ser el material de elección, ya sea aleada o no, blanca, gris o con grafito modificado.

Son muy numerosas las aplicaciones similares a las expuestas y de considerable importancia industrial e impacto económico. Un ejemplo interesante, posteriormente utilizado en el desarrollo experimental de las tesis, es el de las cuñas empleadas en los molinos de bolas utilizadas en las centrales térmicas convencionales de carbón.

La misión de estas cuñas es fundamental en la molienda del carbón y, por tanto, en la granulometría alcanzada y el rendimiento de los quemadores.

Las cuñas van situadas entre las placas de revestimiento del molino, firmemente atornilladas para evitar vibraciones y ruidos durante el funcionamiento, y su misión es elevar las bolas hasta una cierta altura durante el giro del molino para que su posterior caída efectúe la molienda.

Las cuñas trabajan evidentemente en condiciones de golpe y abrasión, pero al tiempo deben presentar una cierta tenacidad, por un lado para evitar el agrietamiento en servicio y por otro para impedir su rotura en el montaje, dado los pares de apriete utilizados.

Materiales muy duros, con dureza superior a los 400HB, resultan inadecuados y los de durezas menores que 300HB sufren desgastes inadmisibles.

La temperatura del trabajo en el molino es otro factor a considerar, suele oscilar según la instalación entre los 80 y los 150°C. Dado que la vida del molino suele ser del orden de los dos años, no es despreciable el ablandamiento de los aceros bonificados de construcción, o el de los aceros de herramientas templados y revenidos, debidos a la equivalencia entre tiempo y temperatura (Larson-Miller).

La importancia económica de estas piezas se debe a su propio coste y a su efecto sobre el rendimiento final de los quemadores, lo que justifica que al acabar la campaña se de la vuelta al a cuña para utilizar el borde opuesto al desgastado en servicio.

El peso de cada cuña y su número es variable dependiendo del tipo de instalación, pero habitualmente es del orden de varias toneladas de cuñas por molino.

Es seguro que las pérdidas por bajo rendimiento en la molienda son muy superiores al de coste de las cuñas, pero en ningún caso ella justificaría el empleo de superaleaciones de base no férrea.

En esta tesis se aborda el desarrollo de una aleación de base férrea perteneciente al grupo de aceros austeníticos de bajo manganeso, que trabaje en condiciones de golpe y abrasión en el rango de temperaturas 80 - 250°C mejorando las respuestas que ofrecen los aceros Hadfield y los aceros templados y revenidos actualmente empleados casi exclusivamente en dicho tipo de aplicaciones.

1.2. Fases de la investigación.

Tras el estudio bibliográfico de este tipo de aceros, que como se ha indicado anteriormente es escaso e incompleto, se consideró el partir de la aleación propuesta por la Climax y tras un estudio metalográfico y de propiedades mecánicas en diferentes estados de tratamiento se modificó selectivamente la composición inicial cara a su optimización.

Posteriormente se comparó el comportamiento a desgaste y choque de las aleaciones que se juzgan más convenientes con el del acero bonificado más utilizado actualmente, un acero de baja aleación 1Cr -0,25Mo tratado a 340 HB.

Las conclusiones del estudio se derivaron de los comportamientos relativos de las aleaciones analizadas frente a sollicitaciones idénticas y en condiciones reales de servicio, dada la falta de fiabilidad de los ensayos de desgaste en laboratorio desarrollados hasta el momento.

Por último, se consideraron las futuras líneas de avance en la investigación factibles de mejorar los resultados conseguidos.

2. ALEACIONES FÉRREAS DE MOLDEO RESISTENTES AL DESGASTE.

2.1. Mecanismos fundamentales de desgaste

El desgaste ocurre cuando dos materiales entran en contacto con movimiento relativo entre ellos. De esta manera el desgaste se define como el deterioro de las áreas de contacto por deformación elástica y plástica hasta que el material deformado plásticamente se desprende.

Los mecanismos por los que el material se desprende se describen habitualmente como: desgaste por fricción, desgaste abrasivo, desgaste corrosivo y desgaste por deformación. Estos términos describen el mecanismo de desgaste más apropiado para una situación dada aunque casi siempre todos ellos operan de manera conjunta.

El desgaste por fricción ocurre cuando dos superficies metálicas entran en contacto íntimo sin lubricante ni otro material entre ellas con movimiento relativo entre ambas. Las asperezas de cada superficie entran en contacto y se adhieren o sueldan entre ellas con la alta presión local provocando la transferencia de metal cuando el movimiento relativo continúa. La acción repetida de la transferencia de masa lleva al deterioro de la superficie y a la formación de productos de desgaste.

La fuerza para cizallar las asperezas soldadas depende de la superficie de contacto real, que es función de la fuerza normal al contacto entre las superficies y al límite elástico del metal más blando. El desgaste por fricción se ha demostrado experimentalmente que es directamente proporcional a la fuerza normal, al movimiento relativo entre las superficies e inversamente proporcional a la dureza o al límite elástico del metal más blando. Cuando los dos metales en contacto son idénticos el desgaste por fricción se llama desgaste adhesivo, cuando son disimilares se conoce como desgaste cohesivo.

El desgaste abrasivo ocurre cuando el material se desprende en la superficie por el contacto con constituyentes duros que están deslizando o rozando respecto a la superficie con presión. Este tipo de desgaste suele ser el que produce pérdidas de peso más severas en los metales. Para minimizar el desgaste abrasivo las fases y constituyentes del metal deben tener mayor dureza que las partículas que actúen sobre él.

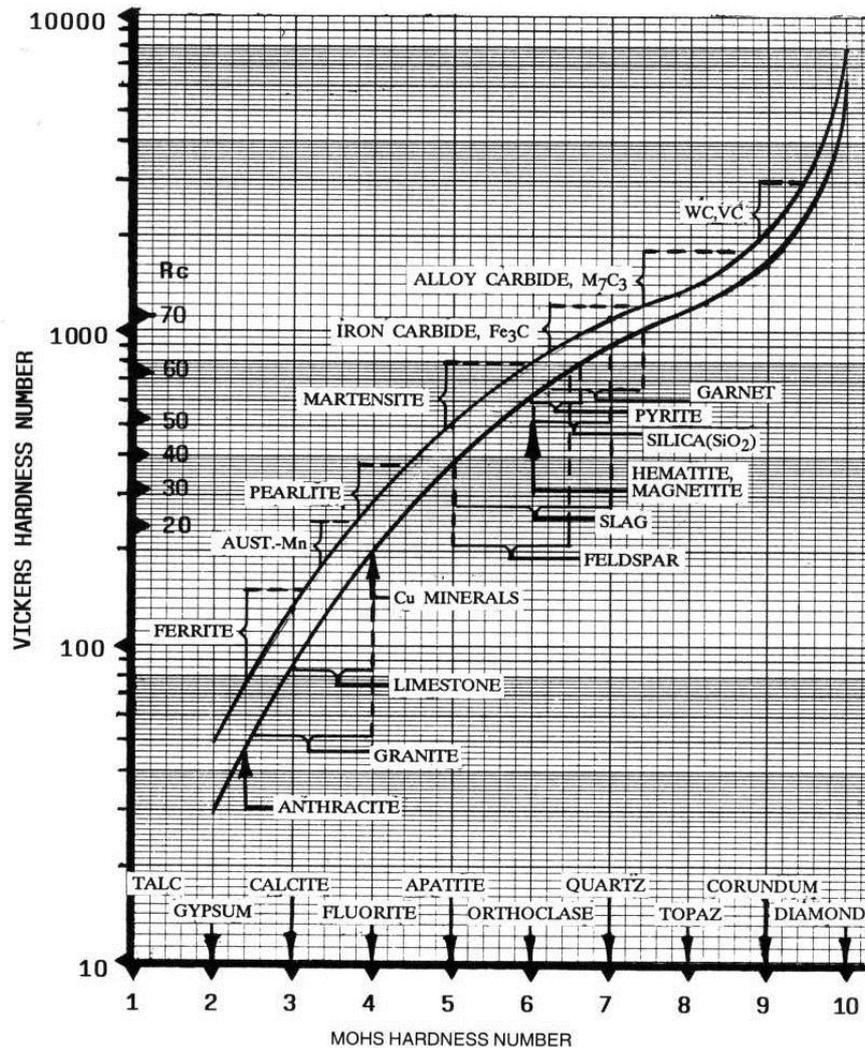


Figura 2.1 Correlación entre las durezas Vickers y Mohs. [23]

La figura 2.1 compara la dureza Vickers de fases y constituyentes presentes en metales con la dureza Mohs de distintos minerales asociados normalmente con el desgaste abrasivo. Existen tres tipos fundamentales de desgaste abrasivo. En el desgaste abrasivo de baja presión la partícula abrasiva no se fragmenta durante la interacción con el metal, produciendo en su superficie pequeños arañazos. El pulido es una forma de desgaste abrasivo de baja presión utilizando partículas de muy pequeño tamaño. Cuando el abrasivo se fragmenta, se produce un desgaste abrasivo de alta presión que daña mucho más la superficie del metal tanto visualmente como en términos de pérdida de peso. La abrasión de alta presión es el mecanismo de desgaste habitual en la molienda de muchos minerales desde un tamaño de medio centímetro hasta las décimas de milímetro. Cuando la intensidad de la abrasión es tan grande que se levantan trozos de material de la superficie dejando cráteres visibles en

la misma se produce una abrasión por arranque de material. Este tipo de desgaste ocurre en la molienda de mineral en tamaños mayores de medio centímetro.

El desgaste abrasivo decrece cuando la dureza del metal aumenta o aumenta el porcentaje en volumen de segundas fases duras en su estructura. Las reducciones del desgaste abrasivo están limitadas solamente por la tenacidad del material o la capacidad de la fase dura de resistir a la fractura. Como norma general, la tenacidad de los materiales resistentes a la fractura decrece al aumentar su tenacidad al desgaste abrasivo.

El desgaste corrosivo sucede cuando la corrosión química o electroquímica ayuda fundamentalmente a cualquiera de los otros métodos de desgaste. En la práctica, para aleaciones férreas los productos de corrosión son casi siempre óxidos, reduciéndose por tanto el desgaste corrosivo con el empleo de elementos de aleación que producen una resistencia a la corrosión. El cromo es un elemento muy eficaz para conseguir este efecto. Con cantidades crecientes de cromo, la oxidación disminuye, pudiéndose llegar incluso pasivación del metal por formación de una capa continua de corrosión. Para evitar el desgaste corrosivo se necesitan altos conocimientos acerca del material que se corroe y del entorno en que se tiene que operar.

El desgaste por deformación es un mecanismo en el que partes de la superficie, por deformaciones debidas a múltiples contactos repetidos, alcanzan suficiente acritud para desarrollar pequeñas fracturas y desprender pequeñas partículas de metal, estos contactos repetidos endurecen progresivamente por deformación la capa superficial y, por tanto, el desgaste por deformación puede ser identificado por microdureza. Materiales con alta dureza y alta ductilidad resisten bien este tipo de desgaste. Este mecanismo está presente siempre en todos los casos de desgaste.

Independientemente del mecanismo, el desgaste puede ocurrir en una gran variedad de situaciones. Todas estas situaciones pueden ser descritas bien por desgaste entre dos cuerpos, o desgaste entre tres cuerpos. El desgaste entre dos cuerpos es un sistema que contempla solo dos componentes en contacto. Estos pueden ser metal contra metal, abrasivo contra metal o fluido contra metal. Esta última situación conocida como desgaste erosivo, incluye un líquido o un gas que arrastra partículas abrasivas en su movimiento. Con la presencia de un fluido es posible que la corrosión ayude a la erosión. Este efecto es conocido como erosión-corrosión. En un sistema de tres cuerpos el abrasivo que está produciendo el desgaste se sitúa entre los dos metales que lo mantienen bajo presión. En este sistema sucede en el comienzo una deformación superficial seguida por el arranque de material, además de la

fragmentación de abrasivo. La presión para producir la fragmentación dependerá de las propiedades del abrasivo, que además afectará a la velocidad de desgaste. El sistema de tres cuerpos describe situaciones muy variadas, desde molinos de bolas hasta rodadura de trenes en ambientes pulverulentos.

El reemplazo de piezas debido al desgaste incluye situaciones de pérdida de material desde menos de 0,1% hasta más del 75% del peso total de la pieza. Por tanto suele ser económicamente ventajoso proveer de resistencia al desgaste solo a la parte de la pieza que se va a desgastar. En situaciones donde la pérdida de un pequeño espesor superficial implica el reemplazo del componente, el temple superficial es un método muy barato para producir una superficie dura resistente al desgaste, un temple superficial adecuado puede, además de ahorrar costes, reducir el riesgo de fractura catastrófica gracias al núcleo tenaz que soporta a la superficie resistente al desgaste.

2.2. Aleaciones férreas de moldeo resistentes al desgaste

Todas las aleaciones férreas moldeadas en la práctica pueden ser empleadas en algún momento como materiales resistentes al desgaste. En la mayoría de las aplicaciones el desgaste del metal es la razón fundamental para el reemplazo de un componente. Las distintas aplicaciones demandan distintos grados de propiedades mecánicas y afortunadamente, las aleaciones férreas abarcan un amplio rango de propiedades gracias a sus distintas microestructuras. Existen seis grandes familias de aleaciones férreas moldeadas categorizadas por su composición química, microestructura y propiedades mecánicas. Además de la dureza, evitar la fractura es fundamental en las aplicaciones de resistencia al desgaste. En la tabla 2.1 se listan algunas aleaciones de las principales familias de aleaciones férreas resistentes al desgaste para moldeo junto con cerámicas y caucho [1].

Material	Composición	HB	HRc	Tenacidad (Kc)
Caucho	---	---	---	---
Hadfield	1,25C 12Mn	200	---	120 (est.)
ASTM A128	1,2C 6Mn 5Cr 1Mo	325	35	35 (est.)
Acero Perlítico	0,63C Cr Mo	265	27	38
Acero Perlítico	0,88C CrMo	345	37	31
Acero martensítico	0,34C Si Cr Mo	530	53	40
Acero martensítico	0,55C Mn Si Ni	610	58	32
ASTM A532 II-E HT	2,9C 20Cr 2Mo 1Cu	745	63	28
ASTM A532 II-B HT	2,5C 15Cr 3Mo	710	62	24
ASTM A532 II-E	2,7C 27Cr	495	50	27
ASTM A532 II-B	2,4C 17Cr 1,6Mo	458	47	24
ASTM A532 II-B	3,6C 17Cr 1,6Mo	530	53	16
NiHard I-A	3,2C 2,2Cr 3,9Ni	550	53	22
NiHard I-D	3,4C 8Cr 6Ni	505	50	23
Fund. Gris Perlítica	2,8/3,5C	370	40	< 20
Cerámicas			>75	<2

Tabla 2.1 Durezas y tenacidades de algunos de los materiales para desgaste

2.2.1. Aceros al manganeso.

A pesar de que la norma ASTM A 128 contiene 10 tipos distintos de aceros al manganeso (tabla 2.2) un gran porcentaje de la producción mundial actual es muy semejante a la composición original. La razón principal de su existencia es asegurar al usuario frente a fracturas inesperadas en aplicaciones donde no es admisible una parada [7].

Los aceros en manganeso son un material de bajo límite elástico y alta ductilidad. Tras un tratamiento de austenización seguido de un hipertemple en agua el acero ASTM A128 grado A está formado por una austenita metaestable cúbica centrada en las caras, endurecida por solución sólida intersticial de carbono y sustitucional de manganeso. Su límite elástico es de unos 300 Mpa con una dureza de unos 240 HB. El alargamiento suele estar entre el 40 y 20 % dependiendo del espesor de la muestra. Su resiliencia es del orden de 150 Julios a temperatura ambiente siendo esta muy superior a la del resto de aleaciones férreas resistentes al desgaste. Además, al poseer una estructura cúbica central en las caras, carece de temperatura de transición dúctil-frágil.

Grado ASTM	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (max)	P (max)
A	1,05-1,35	11,0 min	-	-	-	1	0,07
B1	0,9-1,05	11,5-14,0	-	-	-	1	0,07
B2	1,05-1,2	11,5-14,0	-	-	-	1	0,07
B3	1,12-1,28	11,5-14,0	-	-	-	1	0,07
B4	1,2-1,35	11,5-14,0	-	-	-	1	0,07
C	1,05-1,35	11,5-14,0	1,5-2,5	-	-	1	0,07
D	0,7-1,13	11,5-14,0	-	-	3,0-4,0	1	0,07
E1	0,7-1,13	11,5-14,0	-	0,9-1,2	-	1	0,07
E2	1,05-1,45	11,5-14,0	-	1,8-2,1	-	1	0,07
F	1,05-1,35	6,0-8,0	-	0,9-1,2	-	1	0,07

Tabla 2.2 Grados ASTM A 128 de aceros austeníticos al manganeso

La segunda característica importante de los aceros en manganeso es su capacidad de endurecerse por deformación desde una dureza inicial de 240 HB hasta bastante más de 500 HB. La estructura cúbica central en las caras tiene 12 sistemas de deslizamiento equivalentes y la deformación, que es equiprobable en todos los sistemas, causa rápidamente apilamientos de dislocaciones. Conforme se desarrolla este proceso, el endurecimiento del material afectado produce un incremento en la resistencia a la abrasión. Por ello, los aceros en manganeso son más eficientes cuando las condiciones externas provocan un endurecimiento por deformación intenso.

en la superficie de desgaste del componente. Además, en caso de producirse una fractura en la capa endurecida, la rotura finalizará su avance al alcanzar el núcleo tenaz. Así, en aplicaciones como martillos de molinos de mineral, los aceros al manganeso tienen un rendimiento muy superior al de cualquier otro material.

Los aceros del 12% de manganeso con aleaciones de cromo, níquel o molibdeno se emplean en algunas aplicaciones para incrementar la resistencia al desgaste. Los aceros al manganeso se fabrican con materia prima muy económica y no requieren de ningún consumible caro en su fabricación, por lo que el uso de aceros al manganeso es habitual en aplicaciones en las que se requieran durezas superficiales de hasta 500 HB.

2.2.2. Aceros de construcción al carbono.

Los aceros al carbono son la aleación férrea resistente al desgaste más barata y de mayor producción. Su uso como material resistente al desgaste se limita generalmente a partes estructurales donde una o más superficies se endurecen tras su fabricación.

Su tratamiento térmico puede ser bien, un normalizado o un temple y revenido dependiendo de la aplicación. Las composiciones químicas más habituales típicamente se encuentran en 0,3%C; 0,6-1,2%Mn; 0,8%Si; 0,5%Cr; 0,5%Ni; 0,25%Mo con durezas entre 130 y 190 HB.

Los aceros de construcción al carbono normalizados tienen una microestructura de ferrita como matriz con hasta un 30% de perlita dispersa y su endurecimiento se obtiene principalmente por disminución del tamaño del grano. Sus propiedades típicas son: límites elásticos en torno a 270 Mpa, tensión de rotura en torno a 480 Mpa y alargamientos en torno al 20%. Como la ferrita es cúbica centrada en el cuerpo, el deslizamiento no se produce con la misma facilidad con la que sucede en el sistema cúbico central en las caras y por tanto, al alcanzar grandes deformaciones se produce el clivaje de los granos. Esto hace que su resiliencia sea inferior a la de los aceros al manganeso, en torno a 40 J a temperatura ambiente. Además al ser la estructura cúbica centrada en el cuerpo, estos aceros no pueden ser empleados a temperaturas inferiores a las de transición dúctil-frágil, ya que su resiliencia disminuye bruscamente.

Los aceros de construcción al carbono usados para aplicaciones de desgaste normalmente son tratados antes de su puesta en servicio. Algunos de estos tratamientos incluyen cementación, recargue con recubrimientos duros o temple superficial. El proceso de cementación da como resultado una capa dura de aproximadamente un milímetro con durezas de hasta 60 HRC. Los recubrimientos duros se utilizan principalmente en aceros normalizados expuestos directamente a condiciones abrasivas. Las deposiciones de carburos de elementos de aleación por soldadura superan los 60 HRC sin necesidad de tratamiento térmico posterior [8], [9]. El temple superficial para endurecimiento diferencial se emplea en aceros de construcción al carbono para soportar desgastes por fricción. Los aceros formulados para este tratamiento superficial son generalmente templados y revenidos previamente. Para este propósito se emplean indistintamente el temple por inducción y el temple a la llama, siendo el primero mucho más controlable. El endurecimiento por inducción produce capas del orden de 3 mm como mínimo, mientras que el segundo sólo alcanza mínimos de 4 mm [10], [11]. Los aceros de construcción al carbono

endurecidos superficialmente son frecuentemente la solución más económica para desgastes por fricción.

2.2.3. Aceros perlíticos al cromo molibdeno

Los aceros de baja aleación con carbonos eutectoides o ligeramente superiores, con 2-3% de cromo y décimas de molibdeno se denominan aceros perlíticos al cromo molibdeno. Los grados de bajo carbono tienen en torno a 0.6%C y, tras enfriamiento al aire presentan una estructura totalmente perlítica con unos 30 HRC. Los de alto carbono presentan un contenido carbono de en torno a 0.8% y, tratamiento térmico, tienen una microestructura compuesta por carburos hipereutectoides y perlita muy fina con durezas en torno a 40 HRC. Para evitar la formación de bainitas y/o martensitas de baja tenacidad se necesita controlar la velocidad de enfriamiento. La presencia de estos constituyentes frágiles es causa frecuente del fallo prematuro de piezas fabricadas en estas aleaciones [6].

La estructura perlítica está compuesta de láminas alternadas de ferrita y cementita con aproximadamente un 11% de esta última fase. Comparados con los aceros de bajo carbono, este incremento de cementita incrementa el límite elástico hasta 600 MPa y la carga de rotura hasta 1000 MPa. Sin embargo, el alargamiento se reduce hasta un 5% y la resiliencia cae a valores bajos. A pesar de esto se ha demostrado que estos aceros tienen una resistencia a la abrasión equivalente a la de un acero martensítico [6], [12]. Una característica poco conocida de estos aceros perlíticos es su capacidad de endurecimiento por deformación. En el caso particular de algunas cuñas para molinos de bolas se han observado endurecimientos desde 33 HRC hasta 50 HRC. Este endurecimiento es posible gracias a modos de trabajo que no produzcan grandes tensiones de tracción ni golpes bruscos. Esta capacidad de deformación unida a la presencia de carburos hacen de estos aceros una solución económica para algunos casos de molienda de mineral y desgaste abrasivo.

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	HB	CVN(ft-lb)
0,55-0,65	0,6-0,9	0,3-0,7	2,0-2,5	0,3-0,4	<0,03	<0,03	275-325	7-10
0,65-0,75	0,6-0,9	0,3-0,7	2,0-2,5	0,3-0,4	<0,03	<0,03	325-365	6-9
0,75-0,85	0,6-0,9	0,3-0,7	2,0-2,5	0,3-0,4	<0,03	<0,03	365-400	5-7

Tabla 2.3 Composición de aceros perlíticos al cromo moldeados para desgaste

2.2.4. Aceros templados y revenidos.

Con los aceros templados y revenidos se obtiene una combinación única de resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste. La resistencia a la abrasión de estos aceros se debe únicamente a la dureza final alcanzada. El tratamiento térmico consiste en una austenización completa seguida de un enfriamiento brusco en agua o aceite para producir martensita. Posteriormente se lleva a cabo un revenido entre 200 y 600° dependiendo de la dureza final requerida por cada aplicación. La elección del revenido adecuado permite seleccionar durezas finales desde 30 HRC hasta 60 HRC.

Existen cientos de composiciones normalizadas para estos aceros, seleccionándose fundamentalmente el contenido de carbono por la dureza final requerida y el contenido en aleantes por las necesidades de templabilidad. Para incrementar la templabilidad en piezas gruesas se añaden fundamentalmente cromo, manganeso y molibdeno mientras que las adiciones de níquel se emplean además para aumentar la tenacidad.

Los aceros templados y revenidos compiten con los aceros al manganeso en aplicaciones de desgaste severo. Su uso en lugar de los aceros al manganeso depende de su capacidad de resistir a la fractura frágil en aplicaciones con golpe y choque.

2.2.5. Fundiciones aleadas al cromo.

De todas las aleaciones férreas para desgaste las fundiciones aleadas al cromo son las que presentan mayor dureza. Estas fundiciones presentan una estructura formada por carburos de elementos de aleación en una matriz de martensita y austenita. Su composición consta de un 3% de carbono, cantidades de níquel y cromo que varían entre el 3% y el 30%.

Estas aleaciones pueden alcanzar los 66 HRC con contenidos en carburos de hasta el 40%. Además de la resistencia a la abrasión estas fundiciones presentan una muy buena resistencia a la corrosión dependiendo de la cantidad de cromo disuelta en la matriz. Esta resistencia a la corrosión es especialmente interesante en el manejo de lodos ácidos empleados comúnmente en minería [13]. Las fundiciones de alto cromo son los materiales férreos de mayor resistencia a la abrasión, pero su tenacidad es extremadamente baja, por lo que no admiten trabajo en aplicaciones con golpe o choque.

Grado	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu
I-A	2,2-3,6	<2,0	<0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	<1,0	<0,15	<0,3	
I-B	2,4-3,0	<2,0	<0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	<1,0	<0,15	<0,3	
I-C	2,5-3,7	<2,0	<0,8	<4,0	1,0-2,5	<1,0	<0,15	<0,3	
I-D	2,5-3,6	<2,0	<2,0	4,5-7	7,0-11,0	<1,5	<0,15	<0,1	
II-A	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	11,0-14,0	<3,0	<0,06	<0,1	<1,2
II-B	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	14,0-18,0	<3,0	<0,06	<0,1	<1,2
II-D	2,0-3,3	<2,0	1,0-2,2	<2,5	18,0-23,0	<3,0	<0,06	<0,1	<1,2
III-A	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	23,0-30,0	<3,0	<0,06	<0,1	<1,2

Tabla 2.4 Grados ASTM A532 de fundiciones aleadas al cromo

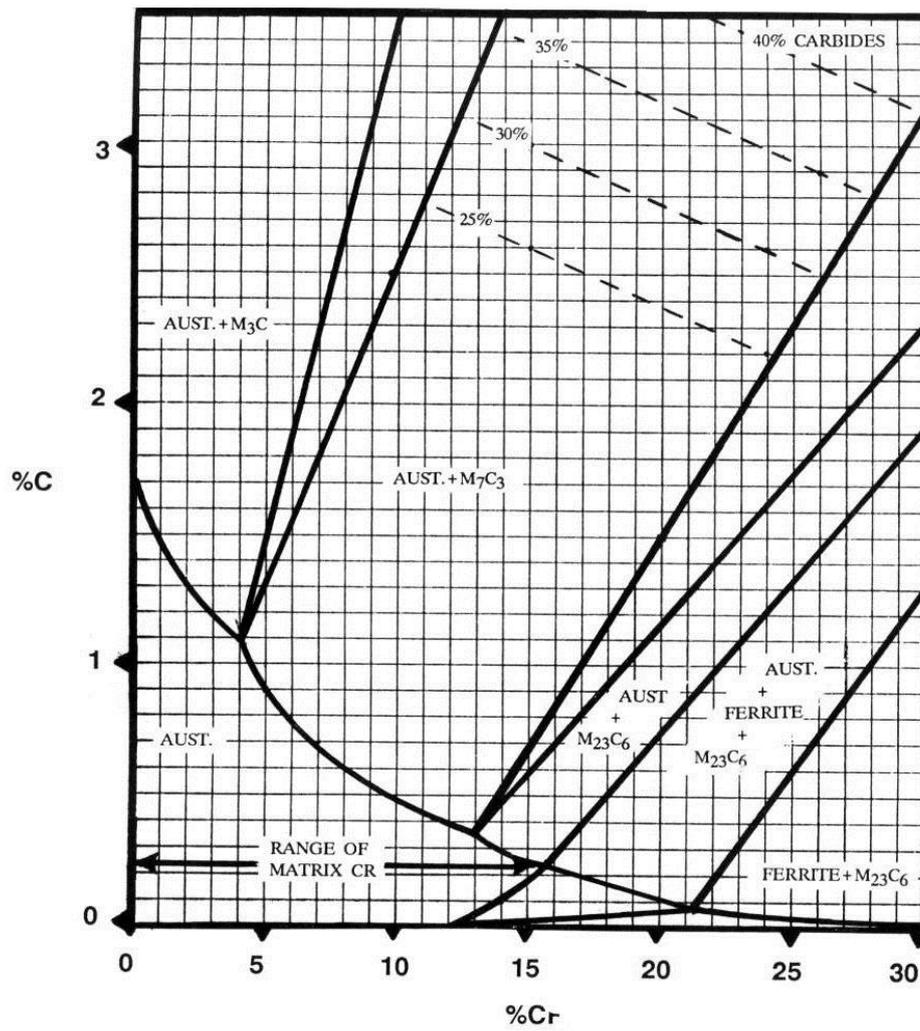


Figura 2.2 Sección isoterma del diagrama Fe-Cr-C a 1050° C

2.3. Ensayos de resistencia al desgaste.

Como se ha mencionado anteriormente, la resistencia al desgaste depende no sólo del material empleado sino de todo el sistema en el que está instalado. A pesar de que existen análisis que muestran la correlación entre los distintos métodos de ensayo [23] los mejores resultados se obtienen cuando se realizan ensayos de laboratorio que simulen las condiciones principales de desgaste y, particularmente, el mecanismo principal que opera en el sistema para permitir relacionar los resultados con la duración real en servicio. Con estas consideraciones existen cientos de ensayos de desgaste descritos [14]. Un gran número de ellos hacen referencia al desgaste por fricción, tanto lubricada como no lubricada y, por tanto, hacen referencia más a aleaciones forjadas que a moldeadas. Además, el desgaste por fricción, no siendo menos importante que los demás, no produce una pérdida de peso tan grande como los desgastes abrasivos y por deformación cuando éstos están presentes. Se describirán por tanto los principales ensayos destinados a evaluar el desgaste abrasivo y en menor medida el desgaste por deformación.

2.3.1. Ensayos de abrasión severa o por arranque de material. [15]

Este ensayo utiliza un molino de mandíbulas modificado, cuyo esquema se muestra en la figura 2.3. La placa fija (1) está fabricada en el material a ensayar y la placa móvil en un material de referencia. La placa móvil abre y cierra según el movimiento de una excéntrica (7). La apertura y el cierre de la placa móvil muelen el material entre ella y la placa fija hasta que es suficientemente fino para pasar por el espacio en la parte inferior de las dos placas. En un ensayo se muelen 1000 kg de roca de entre 4 y 5 centímetros de tamaño en cuatro lotes de 250 kilos cada uno. Tanto la placa fija como la móvil se pesan antes y después de la molienda con una precisión superior a la décima de gramo. Entre cada lote de molienda las mandíbulas se reposicionan para que el ancho en su parte inferior sea de 3.2 mm. Los resultados del ensayo se presentan como tasa de desgaste entre la placa a ensayar y la placa de referencia.

Se han ensayado numerosas aleaciones férreas según este sistema. Los resultados se suelen listar según dos criterios: según el efecto de la microestructura y según el efecto de la dureza. Las gráficas mostrando las bandas de dureza según estos criterios se muestran en la figura 2.4.

Como puede apreciarse, no existe buena correlación entre la dureza original y la resistencia al desgaste siendo la correlación muy buena entre la dureza en estado deformado en la superficie y la resistencia al desgaste. Este endurecimiento superficial se produce en una capa muy fina y ha de ser medido por técnicas de microdureza.

De igual modo puede observarse la gran diferencia en la respuesta al desgaste entre la austenita al manganeso y la austenita al níquel. Esto responde a la gran diferencia en el endurecimiento por deformación de ambas fases.

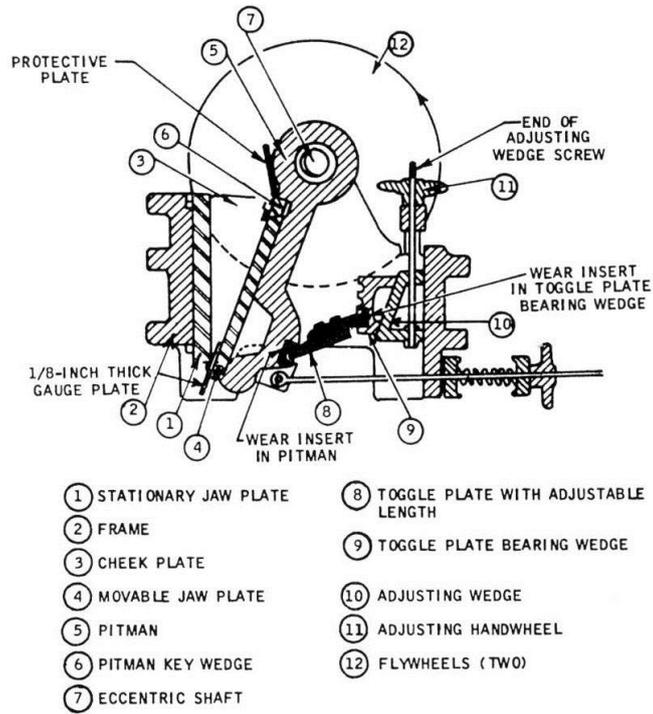


Figura 2.3 Ilustración de un molino de mandíbulas para ensayos de desgaste [15].

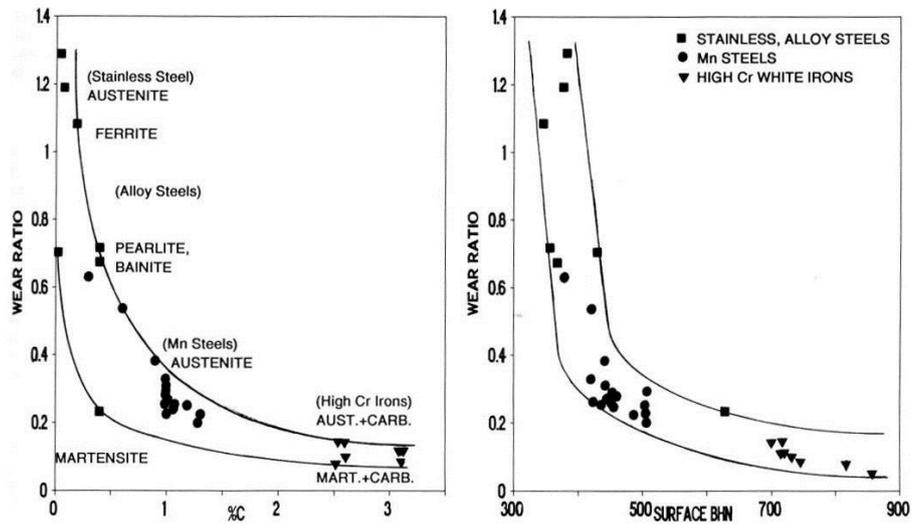


Figura 2.4 Efecto de la dureza y el carbono sobre el desgaste por arranque de material

[15]

2.3.2. Ensayo de abrasión en arena húmeda. [16]

Este ensayo simula el desgaste de alta presión como mecanismo primario. En la figura 2.5 se muestra un esquema de la máquina para este ensayo. Dos muestras situadas una opuesta a la otra recorren un camino de cobre circular que contiene un agua arenosa. Una de las muestras es la aleación ensayar mientras que la otra es un acero de referencia, AISI 1020 generalmente. La presión típica es de 3.8 kg/cm² y la velocidad de 0.6 m/s, mientras que el fluido está compuesto por un 40% de arena de grano 50 y un 60% de agua en peso.

Se realiza un primer período de adaptación de una hora de duración para que tanto la pieza ensayar como la de referencia se adapten a la pista de cobre. Tras este período se pesan cuidadosamente las dos muestras y se realiza un segundo período de una hora de duración. Se utiliza como índice del ensayo el cociente entre la pérdida de peso de la pieza ensayar y de la pieza de referencia. La tabla 2.5 muestra los valores del ensayo de algunos aceros y fundiciones usados en la industria minera donde la resistencia a la abrasión es un parámetro importante. Existe una tendencia general decreciente del índice de abrasión con la dureza, pero otros factores como el endurecimiento por deformación, contenido en carburos y microestructura son necesarios para explicar completamente los resultados [17].

Aleación	Estado	HRC	Factor abrasión
Acero perlítico al Cr	Normalizado	36	0,64
A532 IA	Elim. Tensiones	59	0,67
A532 IIIA	Bruto colada	50	0,8
A532 IIIA	Normalizado	62	0,64
A532 IIB	Bruto colada	46	0,87
A532 IIB	Normalizado + Elim. tensiones	60	0,77
A532 IID	Normalizado	62	0,49

Tabla 2.5 Resultados típicos del ensayo de abrasión en arena húmeda de un acero perlítico y algunas fundiciones aleadas al cromo [17].

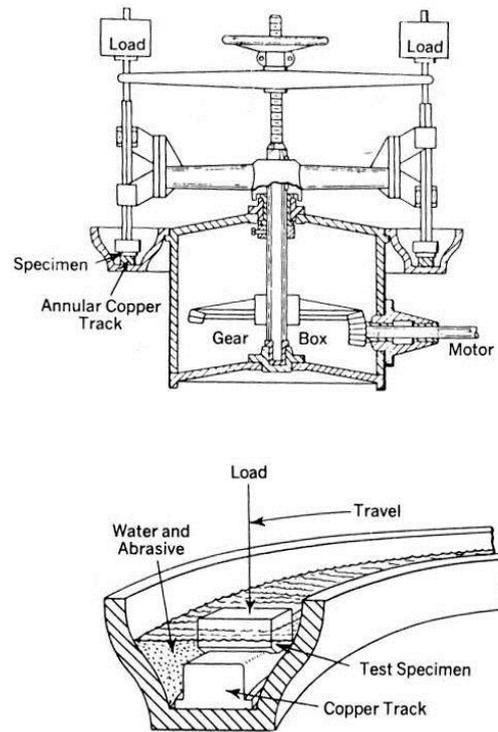


Figura 2.5 Diagrama de la máquina para ensayos de abrasión en arena húmeda [17].

2.3.3. Ensayo abrasivo a dos cuerpos. [18]

El equipo utilizado para este ensayo (ASTM G132) se muestra en la figura 2.6. Es muy común el empleo de fresadoras adaptadas para este ensayo aunque existen máquinas específicas para él. Es un ensayo en seco entre dos cuerpos donde el mecanismo fundamental es la abrasión de alta presión. Una muestra con forma de aguja de 6,35 mm de diámetro bajo un peso de 15 libras se desplaza hacia adelante y atrás sobre un papel de lija que rota a 20 rpm de forma que se superpongan lo mínimo posible las trazadas. El ensayo se lleva a cabo durante siete minutos. Después del ensayo se determina la pérdida de peso de la muestra y se repite el mismo. Se calcula la media de los dos ensayos y se da como pérdida de peso para el material ensayado.

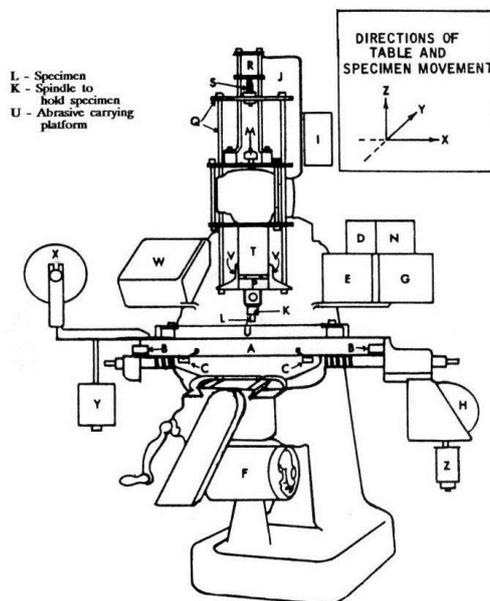


Figura 2.6. Equipo para ensayos ASTM G132 [18].

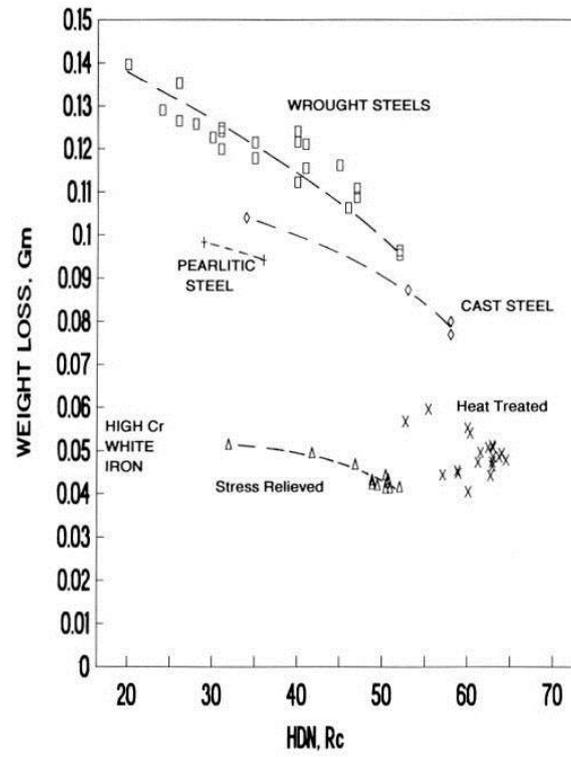


Figura 2.7. Resultados del ensayo ASTM G132 en alúmina de grano 180 para algunas aleaciones férricas [6].

2.3.4. Ensayos de rueda de caucho.

Existen dos ensayos normalizados con ruedas de caucho para la evaluación del desgaste a baja presión; de arena seca o de arena húmeda (ASTM G65 y G105 respectivamente). En ambos ensayos una rueda de caucho rueda a una velocidad predeterminada presionada contra el material a ensayar con una carga fija en presencia del abrasivo. Al final del ensayo se determina la pérdida de material y se utiliza como medida de su resistencia al desgaste de baja presión. Los valores más normales para este ensayo son un caudal de 300 g/minuto de arena sobre una rueda de caucho que gira a 200 rpm con una fuerza normal sobre la superficie a ensayar de 30 libras.

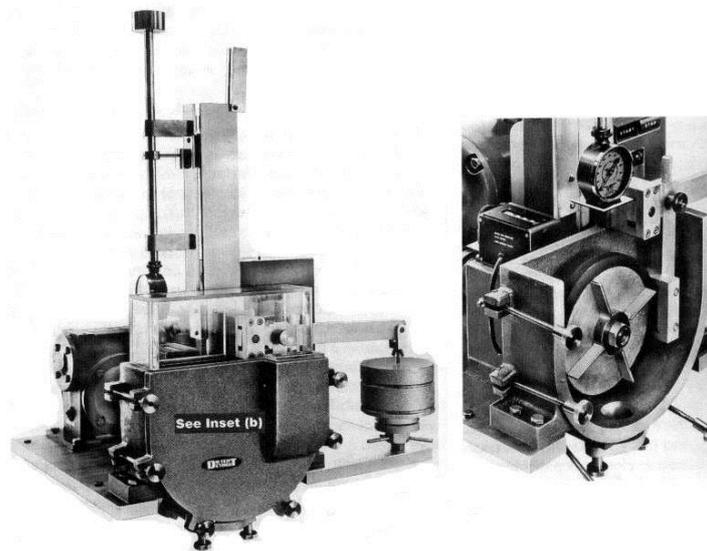


Figura 2.8. Aparato para la realización de ensayos ASTM G105

ASTM G105 normaliza otro test de naturaleza similar al primero con tres ruedas de caucho de durezas distintas rotando en arena húmeda. La figura 2.8 muestra la máquina para realizar estos ensayos y la figura 2.9 muestra los resultados típicos para algunas aleaciones férreas. Éstos resultados muestran una disminución en la pérdida de material cuando se incrementa la dureza del mismo. Sin embargo cuando aparecen carburos libres en la microestructura la resistencia a la abrasión se eleva muy por encima de lo esperado.

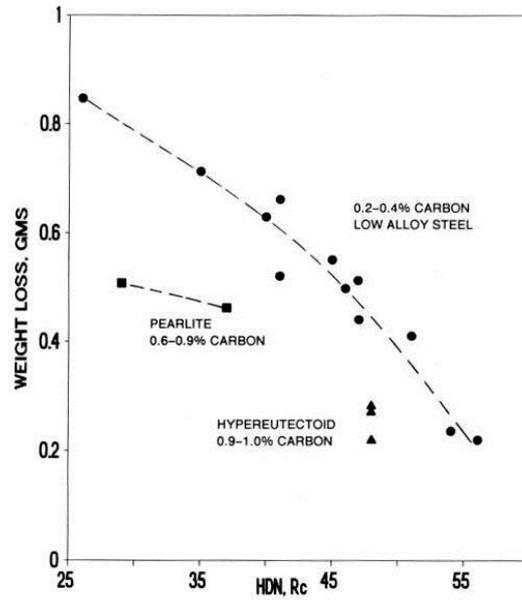


Figura 2.9. Resultados del ensayo ASTM G105 para algunas familias de aceros [6].

2.3.5. Correlación de los ensayos de laboratorio con aplicaciones reales.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio muestran una buena correlación con las aplicaciones reales siempre y cuando se identifique el mecanismo principal de desgaste para poder emplear el ensayo adecuado.

Venne [19] ha demostrado que el ensayo por arranque de material realizado en el laboratorio ha sido consistente con los datos reales contenidos en dientes de cazos y las excavadoras fabricados en aceros de construcción al carbono. Las marcas causadas por grandes piezas de roca son claramente arranque de material aunque sea un desgaste de dos cuerpos y el ensayo de laboratorio sea de tres.

Avery [20] ha demostrado la correlación entre el ensayo de arena húmeda y el desgaste de bolas de cinco pulgadas en un molino de nueve pies con mineral de molibdeno. Se ensayaron varios tipos de materiales férricos, cuyos resultados pueden observarse en la figura 2.10. La falta de linealidad entre los ensayos de laboratorio y el comportamiento real pueden deberse a él mayor desgaste por deformación que se produce en el molino, pero la correlación entre los dos valores es fuerte. Avery también ha demostrado una correspondencia cualitativa entre los ensayos de arena húmeda en laboratorio y el desgaste del revestimiento del molino [17].

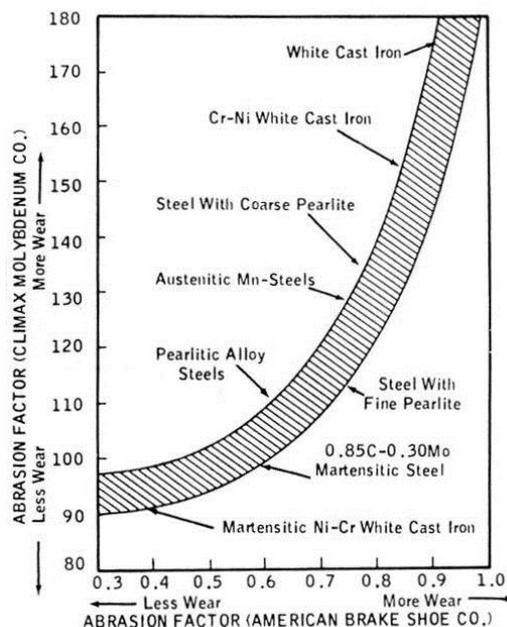


Figura 2.10 Correlación entre desgaste de bolas de molino y factor de abrasión [20]

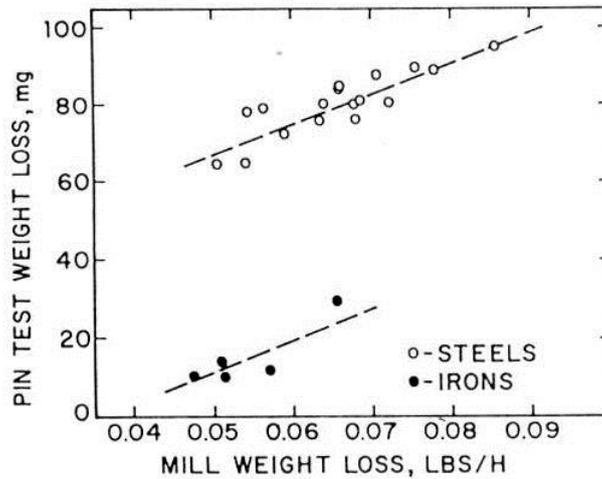


Figura 2.11. Comparativa de desgaste de revestimientos de molinos y ensayo de abrasión a dos cuerpos [21].

Albright y Dunn [21] han observado una buena correlación entre la pérdida de peso en el ensayo de abrasión a dos cuerpos y la del revestimiento de molinos de bolas. Para ello ensayaron el revestimiento de un molino de nueve pies y medio de diámetro por ocho pies de longitud cargado con bolas de acero forjado de tres pulgadas. El desgaste se describió en término de libras de material desgastado por horas de operación. La figura 2.11 muestra los resultados de aceros moldeados y fundiciones aleadas al cromo. Como puede observarse en la correlación entre el ensayo y el caso real es muy buena a pesar de que el ensayo es entre dos cuerpos mientras el caso real es un desgaste entre tres cuerpos.

Stolk [22] ha demostrado la correlación entre el ensayo con ruedas de caucho y el desgaste de arados. El arado de la tierra produce una erosión de baja presión por lo que el ensayo por rueda de caucho duplica convenientemente las condiciones reales a pesar de ser un ensayo entre tres cuerpos y el caso real un desgaste entre dos cuerpos. La figura 2.12 muestra la correlación para distintos materiales férricos.

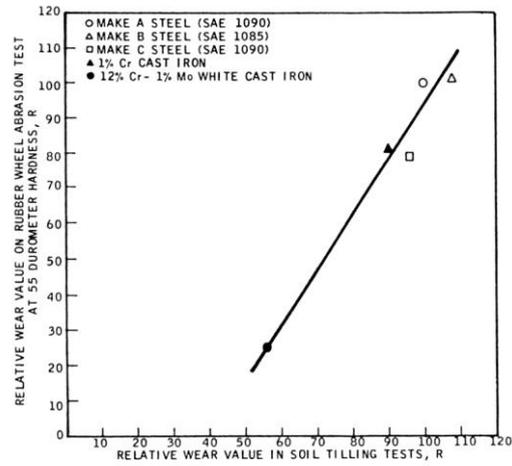


Figura 2.12 Correlación entre desgaste de arados y desgaste en rueda de caucho [22].

2.3.6. Aplicación práctica de los principios de resistencia desgaste.

La naturaleza complicada de los procesos de desgaste hace que las variables del material metálico y del abrasivo que conducen a una determinación cuantitativa del desgaste en un sistema determinado no puedan ser extrapoladas a otro sistema distinto. La extrapolación de estos datos a otros sistemas se realizará normalmente de manera cualitativa. Aún más, es un hecho en la molienda de mineral que las tasas de desgaste varían significativamente dependiendo del pozo o de la localización de la mina de la que procede el mineral. Es por tanto muy conveniente realizar ensayos en términos relativos a un material estándar como referencia. Dunn [23] ha resumido los resultados de ensayos reales en diferentes piezas de maquinaria minera en términos de desgaste relativo. La tabla 2.6 muestra seis comparaciones con variables tales como pérdida de impacto, geometría, dureza y composición química donde puede observarse como afectan al desgaste. Cada comparación es única, y los valores de desgaste relativo de cada comparación no pueden ser usados para el resto.

Variable	Pieza / Equipo	Material	HB	V Imp. (m/s)	Desgaste
Vel. Impacto	Cóncavos de molino	1,2C 12Mn 1Mo	340	0,357	1
	Martillos de molino			63,8	2,59
Geometría	Recubrimiento 3x13	0,6C CrMo Perl.	325	9,14	1
	Recubrimiento 3x8				4,14
Dureza	Bolas de molino de 2,9m	0,8C CrMo Mart.	665	5,33	1
			335		1,39
Dureza	Bolas de molino de 8,5 m	0,8C CrMo Mart.	665	9,14	1
			335		1,39
Vel. Impacto	Bolas de molino de 2,9m	0,8C CrMo Mart.	665	5,33	1
	Bolas de molino de 8,5 m			9,14	3,96
Material	Cóncavos de molino	2,7C 20Cr 2Mo 1Cu	550	0,357	1
		1,2C 12Mn 1Mo	340		2,6

Tabla 2.6 Condiciones de las comparativas de desgaste en condiciones reales

La velocidad de impacto ha sido estudiada para mismo material, acero austenítico al manganeso, en dos molinos diferentes: un molino giratorio y un molino de martillos. Las piezas que se ensayaron fueron las de máximo desgaste: las mordazas del molino giratorio y los martillos del molino de martillos. El molino giratorio se alimenta con rocas grandes, y las cargas se imponen lentamente mientras presionan la carga. En el caso del molino de martillos, el eje gira a cientos de revoluciones por minuto, y el martillo golpea a gran velocidad las rocas. El primer caso es un desgaste de tres cuerpos mientras que el segundo es un desgaste de dos cuerpos. Los índices de

desgaste relativo muestran que, para este caso particular, los martillos se desgastan 2.59 veces más deprisa que las mordazas. En ambos casos las superficies de desgaste muestran que el mecanismo principal es el desgaste por arranque de material siendo también importante el desgaste por abrasión a alta presión. A pesar de que existen otras diferencias entre los dos casos ninguna es tan importante como la velocidad del impacto.

La segunda comparación demuestra como la geometría del revestimiento puede afectar al desgaste. Este ensayo se realizó en un molino de bolas con una pequeña cantidad de las mismas moliendo sílice. El material del revestimiento es un acero perlítico al cromo molibdeno. En un caso el espesor del revestimiento se incrementaba desde tres pulgadas en la base hasta ocho pulgadas, y se situó en la casa del molino paralelo al eje de rotación con la dimensión mayor en dirección radial. Esta geometría se desgastó 4.14 veces más rápida que el revestimiento cuyo espesor aumentaba de 3 pulgadas en la base a 13 pulgadas con una mayor inclinación. Este revestimiento más alto actuó reduciendo el roce con el mineral abrasivo. Al reducir el roce el mineral alcanza una mayor altura en el molino y su caída es sobre el propio mineral con una fuerza normal muy superior.

Las comparaciones tercera y cuarta demuestran el efecto de la dureza en el desgaste. En un caso se empleó un molino de bolas pequeño (2.9 m de diámetro) para determinar la tasa de desgaste de bolas de la misma composición pero en dos niveles distintos de dureza. En el otro caso, un molino más grande realiza la comparación de las mismas composiciones y durezas empleadas del molino pequeño. En los dos casos la bola más blanda se desgastó 1.39 veces más rápido que la bola más dura, pero que la tasa relativa de desgaste coincida no implica que la tasa de desgaste absoluto sea la misma. Como puede observarse en la siguiente comparativa la tasa de desgaste de las bolas de cinco pulgadas es 3.96 veces mayor cuando se ensayaron en el molino grande que cuando se ensayaron en el molino pequeño.

La última comparativa muestra el efecto de la composición química. Se ensayaron dos materiales muy distintos, un acero austenítico al manganeso y una fundición aleada al cromo. El acero al manganeso tiene una dureza inicial de 340 HB pero alcanza por endurecimiento por deformación los 550 HB en servicio. La fundición ha sido tratada térmicamente hasta 550 HB pero cuenta en su microestructura con abundantes carburos de elementos de aleación. Al ser la aplicación carente de golpes y choques el acero al manganeso se desgastó 2.6 veces más que la fundición blanca al cromo. La abrasión por arranque de material es el mecanismo fundamental de desgaste, y en

ausencia de roturas frágiles la fundición resulta superior. Los resultados de este caso son cualitativamente iguales a los de los ensayos de abrasión por arranque de material.

Existe un interés comprensible en la reducción de costes, no sólo en la industria de fundición sino en todo tipo de industrias incluyendo la minería. Esto suele llevar a la búsqueda de materiales con mayor resistencia al desgaste. Uno de los materiales que está posiblemente sobreutilizado en la industria de la molienda del mineral son los aceros austeníticos al manganeso. Actualmente se intentan sustituir estos aceros al manganeso por aceros martensíticos con la esperanza de incrementar la vida en las piezas en desgaste y disminuir los costos [24]. Si bien esto puede funcionar en algunos casos, en otros la tenacidad necesaria para evitar la fractura frágil del material puede conducir a un empeoramiento tanto en la vida del material como los costes de operación. La solución a muchos de estos casos es el tratamiento previo de estos aceros al manganeso mediante deformación hasta una dureza superficial de unos 400 HB o, como la que propone el presente trabajo, modificar la composición química original de los aceros al manganeso para adecuarla a situaciones de desgaste con menores presiones.

2.4. Aceros austeníticos al manganeso.

2.4.1. Características generales

Los aceros austeníticos al manganeso suelen contener altos contenidos en carbono y manganeso en relación aproximada de 1 a 10, habitualmente alrededor de 1,2% - 1,5% y 12% - 15% respectivamente.

Junto con carbono y manganeso aparecen en algunas composiciones de Hadfield cromo, níquel o molibdeno en cantidades entre 1% y 4%. Algunas composiciones estándar de aceros austeníticos al manganeso se recogen en la tabla 2.2.

No suelen emplearse carbonos superiores al 1,4% por la dificultad de obtener estructuras austeníticas libres de carburos. Los contenidos altos en azufre en estos aceros son menos perjudiciales que en el resto debido al alto contenido en manganeso, que lo fija en pequeñas inclusiones redondeadas de escasa influencia sobre las propiedades del acero. Sin embargo se suele mantener el azufre tan bajo como en otros aceros para minimizar los riesgos de roturas por fatiga nucleadas en dichos sulfuros.

Entre sus propiedades destacan alta resiliencia, ductilidad, endurecimiento por deformación y un precio bajo. Todas estas características harían ya de por sí muy interesantes a estos aceros en multitud de aplicaciones, pero al combinarse con una alta resistencia al desgaste, el interés de estos aceros es enorme.

El límite elástico de estos aceros se sitúa entre 350 y 400MPa, algo equivalente a lo que un acero de bajo o medio carbono puede ofrecer, pero con una tenacidad muy superior en los primeros.

Es a partir de este límite elástico donde comienzan gran parte de las ventajas de los aceros Hadfield. Dada su estructura cúbica centrada en las caras, es normal en estos aceros encontrarse con alargamientos excepcionales tanto en pieza fundida como laminada, obteniéndose valores superiores al 40% en casi todos los grados y por encima del 50% en muchos casos, además de resiliencias superiores a 150 J a temperatura ambiente.

Junto a estos extraordinarios alargamientos, el acero Hadfield tiene una inmensa capacidad de endurecimiento por deformación, algo que permite obtener resistencias últimas a la tracción del orden de los 1000 MPa, resultando relaciones entre límite

elástico y carga de rotura en torno a 0,4, frente a los 0,65 típicos de los aceros al carbono de construcción sin tratamiento.

Gracias a esto el límite de fatiga es también anormalmente elevado con respecto a su límite elástico, habitualmente 270 Mpa. Como contrapartida su módulo elástico es de 186 GPa, inferior a los 210 GPa de los aceros al carbono o de baja y media aleación.

El tratamiento térmico de estos aceros es casi de forma exclusiva un hipertemple desde unos 1050 °C para obtener una estructura austenítica a temperatura ambiente libre de ferritas y carburos. Este hipertemple hace que, al igual que sucede en fundiciones férreas, las propiedades mecánicas sean muy sensibles al espesor de la pieza.

Además, debido a su baja conductividad térmica, los espesores superiores a los 150 mm suelen desarrollar fragilidad en el núcleo ya que su velocidad de enfriamiento es muy superior a la crítica para obtener una cantidad razonable de austenita.

Habitualmente se emplea una hora de mantenimiento por centímetro de espesor a alta temperatura, sin que exista peligro de descarburaciones más que en grandes espesores en la zona superior de temperaturas. En casos extremos de temperatura y tiempo se han llegado a observar ligeras descarburaciones.

En estado hipertemplado su resistencia a la abrasión y al desgaste con presión es excelente. En el contacto metal-metal su comportamiento es excepcional, con mejores características en cargas altas. En la placa central de los bogíes de vagones de transporte de mineral, la duración media ha pasado a ser varias veces superior a la de los aceros perlíticos alcanzándose durezas superficiales finales del orden de los 550HB. En placas de desgaste en trenes de desbaste de acero, la duración media ha llegado en algunos casos a ser ocho veces superior a la de los aceros perlíticos.

En los ensayos de abrasión con presión y arena de cuarcita húmeda se comporta como aceros de herramientas con temple y revenidos a 500 HV, y mejor que las fundiciones blancas, manteniendo una tenacidad muy superior a cualquiera de los materiales mencionados.

En el trabajo en abrasión o desgaste sin presión el acero Hadfield no presenta resultados tan brillantes. Al no existir presión no se produce el endurecimiento por deformación necesario para el trabajo a desgaste, y las pérdidas de peso son coherentes con la baja dureza del acero. Para algunas aplicaciones se puede deformar superficialmente el acero antes de ponerlo en servicio, pero existe siempre el

peligro que una vez desaparezca la capa endurecida el acero no haya desarrollado más deformación y el desgaste sea catastrófico.

2.4.2. Endurecimiento por deformación.

El estudio de las causas del endurecimiento de los aceros Hadfield se ha desarrollado desde los años 30 hasta la actualidad a través de una larguísima lista de trabajos. En un comienzo se pensó en que el endurecimiento por deformación de estos aceros podía ser debido a la transformación martensítica, pero pronto se demostró la estabilidad de la austenita frente a la deformación mecánica [28] [29]. La transformación sólo se produce cuando el contenido en carbono o manganeso disminuye drásticamente por debajo de los límites nominales de estos aceros.

Los estudios continuaron atribuyendo el endurecimiento a diversas causas tales como el maclado mecánico [29] [30], a la estructura de dislocaciones [31] o a la interacción entre dislocaciones y fallos de apilamiento [32] e incluso al anclaje de las dislocaciones por átomos de carbono en solución sólida de forma dinámica (envejecimiento dinámico por deformación, o dynamic strain aging, DSA) [33] [34] [35] e incluso la formación de estructuras de baja energía Mn-C y Mn-C-Cr que minimizan la deformación producida por el intersticial (figura 2.13) y su interacción con las dislocaciones [36], situaciones ambas que explicarían el aspecto serrado de las curvas de deformación.

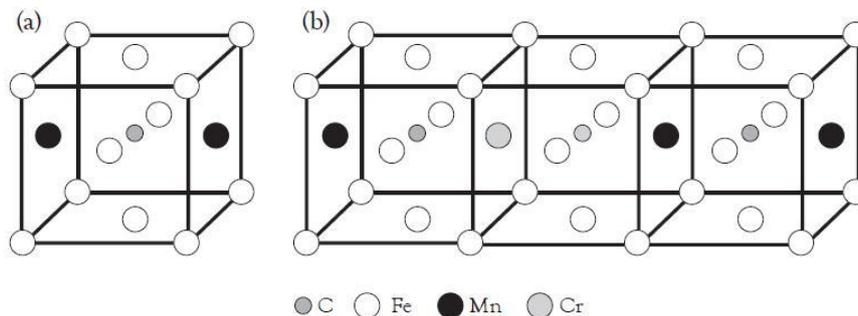


Figura 2.13. Pares Mn-C y Mn-C-Cr de baja energía en aceros austeníticos al manganeso [26]

Estudios posteriores [37] demostraron que los inusuales endurecimientos por deformación de los aceros Hadfield, que no pueden ser completamente explicados por los fenómenos descritos, se producen por pseudomaclaje, producto del que podría aparecer una nueva fase fuertemente distorsionada con simetría ortorrómbica.

Desde entonces no se ha descartado la posible formación de martensita ϵ sobre los planos de deslizamiento de los aceros de más alto manganeso pero obviamente no se ha podido confirmar por microscopía. Lo que sí está suficientemente confirmado es el maclado fino de la estructura tanto por microscopía como por EBSD [38]

A partir de estas investigaciones se desarrollan en el año 2004 los aceros TWIP (TWinnig Induced Plasticity) con bajo carbono y hasta un 20% de manganeso y pequeñas cantidades de otros aleantes, que permiten alargamientos de hasta un 90% gracias a una ajustada energía asociada a la creación de defectos de apilamiento.

Cuando esta energía (SFE) se encuentra en torno a los 10 mJ/m² o inferior, la deformación se consumirá en la formación de martensita ϵ mientras que a partir de unos 35mJ/m² la deformación se llevará a cabo por movimiento de dislocaciones. Para estos aceros la SFE se sitúa en torno a los 20 mJ/m² con lo que el principal mecanismo de deformación plástica es el maclado por dislocaciones parciales sobre los planos compactos que además desalojan a los átomos intersticiales de los intersticios mayores hacia los menores en la región maclada [39].

Por supuesto que un único efecto seguía sin explicar completamente el endurecimiento por deformación en los Hadfield. Por un lado, el mecanismo del maclado necesita del movimiento de las dislocaciones para explicar el endurecimiento. Una vez maclado el acero, la principal consecuencia es el afino del tamaño de grano efectivo de la aleación que limita el recorrido de las dislocaciones y aumenta la dureza del material por efecto Hall-Petch. Incluso la región maclada puede actuar como un grano y ser poblada por dislocaciones [40].

Por otro lado, una baja SFE no asegura necesariamente la deformación por maclado mecánico. Los aceros austeníticos al manganeso sin carbono deforman por deslizamiento de dislocaciones a pesar de contar con una baja SFE, mientras que otros con carbonos entorno a medio punto presentan deformación por maclado mecánico [41] [42] y [43].

2.4.3. Elementos de aleación

Los principales aleantes de los aceros Hadfield son sin duda el manganeso y el carbono, y su misión fundamental es estabilizar la estructura austenítica del acero. Sin embargo ambos pueden formar distintos carburos entre ellos o en combinación con otros metales. Para las concentraciones habituales de estos elementos los carburos más habituales son los $(Fe,Mn)_3C$.

Para que el acero Hadfield presente sus mejores propiedades de alargamiento y tenacidad estos carburos deben estar completamente disueltos en la matriz por efecto del hipertemple, hecho este que se facilita con los contenidos más bajos en carbono. Sin embargo, para que presente los mejores resultados en resistencia al desgaste el carbono debe ser lo más alto posible. La solución de compromiso entre ambos efectos suele estar en torno al 1,3% C.

El silicio se emplea como en casi todas las composiciones de acero. Aunque puede elevar el límite elástico de estos aceros no se suele emplear por encima del 1%.

El fósforo y el azufre suelen mantenerse en los límites habituales para acero. Se ha comprobado que gracias a la elevada tenacidad de estos aceros contenidos altos en fósforo no producen grandes aumentos de la fragilidad pero sus aplicaciones son limitadas. En cuanto al azufre, los altos contenidos en manganeso hacen casi imposible la aparición de fragilidad en caliente pero sus supuestos beneficios para la mejora del mecanizado son inútiles en un acero inmecanizable, luego se prefiere controlar su contenido para evitar inclusiones no metálicas indeseables.

El cromo aparece habitualmente en las composiciones de los aceros Hadfield. Aumenta el límite elástico y la resistencia al desgaste por formación de carburos de cromo que no se disuelven completamente en el tratamiento de hipertemple, por lo que se deben emplear las temperaturas más altas posibles. Además, la fracción de cromo disuelta en la austenita permite mejorar ligeramente su resistencia a la corrosión. Contenidos en cromo por encima del 2-3% pueden afectar a la tenacidad por el elevado contenido en carburos tras hipertemple.

El molibdeno se suele añadir en porcentajes de hasta el 2% aumentando el límite elástico y la resistencia al desgaste al igual que el cromo. También como aquel, forma una parte de carburos insolubles, mientras que la parte disuelta en el hipertemple desplazará la formación de otros carburos, formándose por calentamientos por encima de 200°C pequeños carburos redondeados de que evitan las agujas en borde de grano que producen fragilidad e incluso la formación de perlitas.

Cuando el molibdeno supera el 1,5% hace más favorable la estructura de bruto de colada del material por la formación de carburos durante la solidificación del acero. Este efecto puede tener como inconveniente una temperatura de hipertemple menor por la posibilidad de quemar el acero por fusión de las zonas interdendríticas muy segregadas.

El níquel es un gammágeno potente que se emplea fundamentalmente para aumentar la estabilidad de la austenita y permite suprimir la formación de carburos hasta los 500 °C. Sin embargo, disminuye la resistencia al desgaste y el límite elástico.

El cobre se puede emplear en cantidades de hasta el 5% con los mismos fines que el níquel, pero en los porcentajes superiores al 3% puede fragilizar el acero por su solubilidad limitada [44].

El titanio se suele añadir en pequeñas cantidades para producir la formación de carburos y carbonitruros que afinan la estructura. En cantidades elevadas los carburos producen fragilidad.

El vanadio puede emplearse al igual que el molibdeno, como formador de carburos muy estables, o como aleante para endurecimiento por precipitación. Tras hipertemple tan alto como sea posible para disolver la máxima cantidad de vanadio en la austenita se produce una maduración a 550 °C que eleva fuertemente el límite elástico y la resistencia al desgaste, pero disminuye la tenacidad y la capacidad de endurecimiento por deformación.

El nitrógeno ha sido añadido recientemente a la lista de los aleantes de los aceros Hadfield. Como gammágeno intersticial ayuda a mantener la estabilidad de la austenita al tiempo que la endurece, por lo que es capaz de aumentar simultáneamente resistencia mecánica, tenacidad, capacidad de endurecimiento por deformación y resistencia a la corrosión en algunos medios. Su capacidad de endurecimiento es superior al carbono y aumenta la tendencia al maclado mecánico de los aceros Hadfield, así como la interacción macla-deslizamiento. En realidad casi todos los aceros Hadfield del mercado sin aleantes especiales como titanio o aluminio contienen nitrógeno en torno a 150 ppm, que pueden aumentarse hasta el 0,5% en aceros aleados con nitrógeno. Por supuesto, para realizar aleaciones con nitrógeno hay que eliminar todos los elementos de gran afinidad por el nitrógeno de la composición de estos aceros.

El aluminio es el otro elemento añadido recientemente a las composiciones de Hadfield. Al aumentar la solubilidad del carbono en la austenita sin peligro de formación de carburos podemos lograr todas las ventajas de incrementos en carbono sin los inconvenientes de la formación de carburos hasta valores superiores de carbono. Contenidos en torno al 1% de aluminio permiten aumentar el contenido en carbono desde 1,3% hasta 1,8% aumentando la tasa de endurecimiento por deformación y la dureza inicial del acero. El motivo del incremento de la tasa de endurecimiento del aluminio en los Hadfield es que este suprime en gran medida la capacidad de maclado del material aumentando el efecto de envejecimiento mecánico por deformación, mucho más eficaz que el maclado.

2.4.4. Aceros austeníticos de bajo y medio manganeso

Como comentamos en los apartados anteriores, los aceros Hadfield de alto manganeso tienen un extraordinario comportamiento al desgaste mientras la causa de dicho desgaste sea capaz, mediante endurecimiento por deformación, de formar una capa superficial endurecida sobre el núcleo blando y tenaz de estructura austenítica sin deformar.

Sin embargo, si la causa del desgaste no ejerce presión suficiente para obtener ese endurecimiento por deformación, el acero, con una baja dureza inicial, tendrá una tasa de desgaste muy elevada.

Para mejorar la respuesta en aplicaciones donde las bajas presiones no generen esta carga se deben formular aceros donde la estabilidad de la austenita sea inferior, de manera que el comienzo del endurecimiento sea a cargas mucho más bajas.

Dado que la estabilidad de la austenita viene dada por los contenidos en gammágenos, y el principal gammágeno en los aceros Hadfield es el manganeso, se reduce su contenido hasta un 5-9%. De esta manera se consigue una tasa de endurecimiento por deformación superior (figura 2.14).

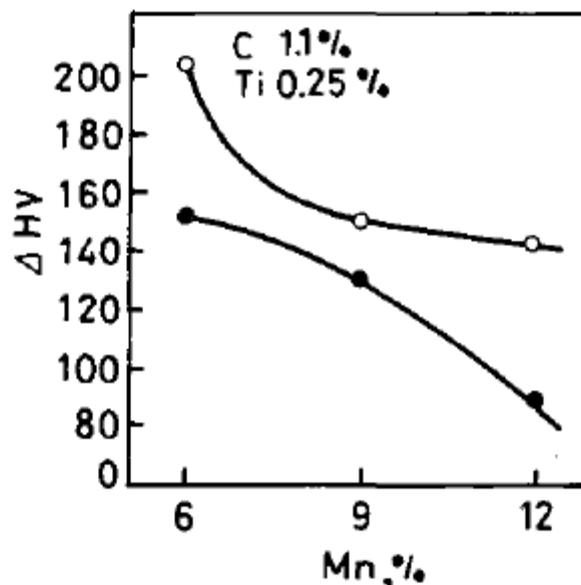


Figura 2.14. Endurecimiento por martillado suave para aceros con manganeso variable hipertemplados (círculo blanco) y envejecidos a 200 °C (círculo oscuro) [27]

Debido a la pérdida de estabilidad de la austenita la tenacidad disminuye fuertemente, sobre todo por la precipitación de carburos en forma acicular en borde de grano. Para

eliminar estas morfologías se suele añadir molibdeno y cromo de forma independiente o conjunta en cantidades entre 1 y 3%.

Al igual que en el caso de los aceros de alto manganeso, el molibdeno forma carburos finos y dispersos durante la solidificación del acero, afinando la estructura, y permaneciendo en parte en solución sólida en la austenita. En el comienzo de la segregación de carburos, los carburos de molibdeno aparecerán antes que los de cromo, hierro o manganeso, y con morfologías mejores para la tenacidad del acero. Y como consecuencia adicional la existencia de segundas fases duras y dispersas mejora el comportamiento a desgaste del material para una dureza dada.

Como la capacidad de endurecimiento de los aceros austeníticos al manganeso depende fuertemente del contenido en carbono, este no suele reducirse en los aceros de medio y bajo manganeso con el fin de conservar toda la capacidad de endurecimiento posible.

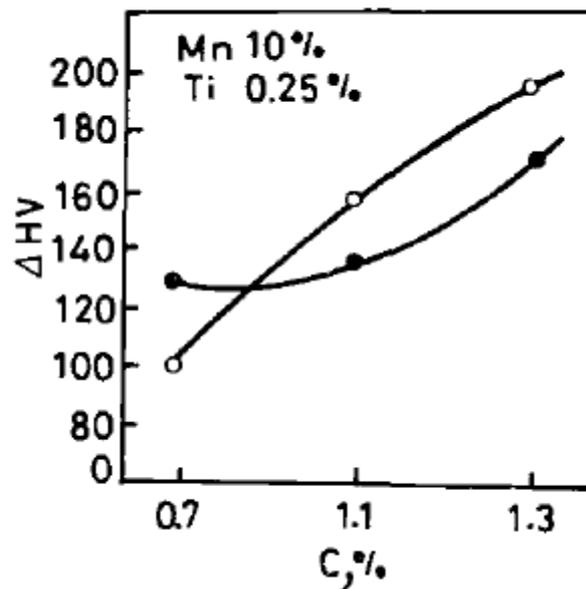


Figura 2.15. Endurecimiento por martillado suave para aceros con carbono variable hipertemplados (círculo blanco) y envejecidos a 200 °C (círculo oscuro) [27]

A diferencia del manganeso, otros aleantes gammágenos no carburígenos ni estabilizadores de los carburos, pueden ayudar a evitar la fragilidad propia de estos aceros. La sustitución de parte del manganeso por níquel, cobre o nitrógeno puede retardar la formación de carburos fragilizantes con la temperatura. Por supuesto estas

adiciones han de contar con una adecuada reducción de manganeso para no estabilizar en exceso la austenita.

El los mecanismos de endurecimiento por deformación de estos aceros difieren bastante de los que suceden en los aceros de alto manganeso. A diferencia de aquellos, en los que la austenita es estable frente a las deformaciones (figura 2.16 a), la desestabilización de la austenita provocada por el recorte en la composición química de elementos gammágenos hace posible la transformación martensítica por deformación (figura 2.16 b).

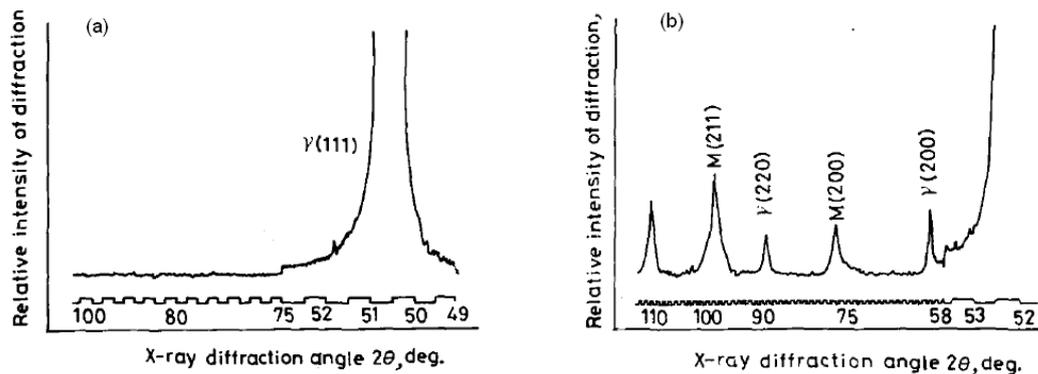


Figura 2.16. Difracción de rayos x tras endurecimiento por deformación de aceros austeníticos con 13%Mn (a) y 7%Mn (b). [27]

El endurecimiento por la dureza de la martensita en la periferia de estos aceros no explica completamente los valores de dureza obtenidos. Cuando se produce la transformación se está convirtiendo una fase muy densa en otra muy dura y con mucha menor densidad. Como consecuencia, todas las zonas adyacentes a la nueva fase transformada sufren una fuerte deformación que, o bien genera nuevas transformaciones martensíticas o endurece por deformación la austenita circundante, produciéndose una realimentación muy importante en el endurecimiento.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL.

3.1. Moldeo y colada de probetas.

Se realizaron 10 coladas con composiciones variables de carbono, manganeso, cromo, molibdeno y cobre. La composición química de cada una de ellas se basa el conocimiento previo de los elementos de aleación sobre los aceros austeníticos al manganeso y los resultados obtenidos en las coladas anteriores.

Dada la práctica imecanizabilidad del acero objeto de estudio, aún con herramienta cerámica, debido al endurecimiento típico de los aceros tipo Hadfield, se hizo necesario el modelo en cáscara con objeto de obtener probetas para los ensayos mecánicos con una precisión dimensional aceptable que no requiriera mecanizado alguno.

Para ello se fabricó una placa modelo (figura 3.1) que proporcionaba dos probetas de tracción de dimensiones normalizadas, dos de plegado y dos probetas cilíndricas para los ensayos químicos espectrográficos.



Figura 3.1. Placa modelo.

Las probetas para estudio metalográfico se obtenían, en todos los casos, de los canales de alimentación internos del molde. El diámetro de estos canales, 15 mm, permitía el encapsulamiento de las probetas tras corte con refrigeración adecuada en la tronzadora metalográfica.

En un molde de arena obtenido mediante moldeo con arena química (resinas furánicas) se obtenía una plancha de dimensiones 250x200x20mm diseñada para ensayos de desgaste en laboratorio. Con objeto de mejorar la piel de colada de la plancha se efectuaba un cuidadoso pintado con pintura de circonio de la arena de contacto del molde.

La fusión y colada en los moldes se realizó, en todos los casos, mediante horno de inducción de media frecuencia (3000 Hz) con 50 Kg de capacidad en acero de crisol.

Dada la alta basicidad, tanto de la escoria como del caldo, de los aceros altos en manganeso y con objeto de reducir o eliminar la interacción caldo-refractario horno o cuchara, y caldo-arena molde, se empleó un refractario neutro tanto para el revestimiento del horno como de la cuchara de colada.

En caso de las cáscaras la arena utilizada era necesariamente la arena prerrevestida de tipo sílice, única que se comercializa. Dada la mayor velocidad de enfriamiento del metal en las cáscaras la interacción metal-molde es prácticamente inexistente.

En cualquier caso, considerando las dimensiones de los moldes y su alta velocidad de enfriamiento, podía utilizarse arena de sílice en todos los casos sin peligro de deterioro superficial de las probetas.

En el caso del horno de fusión por inducción es claro que la reacción refractaria-caldo inutilizaría el revestimiento rápidamente, y por ello se acudió al refractario neutro con excelentes resultados.

Es conocido que para la fusión de aceros Hadfield se emplea refractario básico en los hornos de acero, lo que obliga a evitar descensos en la temperatura del refractario por debajo de 700°C, con objeto de evitar su agrietamiento.

Este hecho impone en hornos de funcionamiento discontinuo la necesidad de disponer mecheros para evitar la caída de temperatura. Ello se traduce en un coste añadido, imposible de asumir para las pequeñas fundiciones trabajando a uno o dos turnos y con paradas obligatorias los fines de semana.

Si además se trata de hornos de crisol de inducción, de mucha menos capacidad y con mayores choques térmicos, se comprende la dificultad de la fabricación del acero Hadfield con 12-14%Mn para la mayor parte de las pequeñas fundiciones.

En el caso de los aceros estudiados en esta tesis cuyo contenido de manganeso es sensiblemente menor (6-8%Mn), las refractarias neutras son suficientes para garantizar una vida aceptable del revestimiento, una ausencia de agrietamientos, un bajo coste y una reducida interacción caldo-refractario, lo que supone un importante avance industrial para la obtención de piezas resistentes al desgaste con esta familia de aceros con austenita metaestable de bajo contenido en manganeso.

En cuanto a la materia prima utilizada para el lecho de fusión, se partió siempre de chatarra seleccionada proveniente de recortes de chapa de acero dulce para troquelado, lingote de fundición, tipo Sorel, de muy bajo contenido de azufre, utilizado para la obtención de fundición esferoidal, y ferroaleaciones (Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Cr y Fe-Mo) de composición química garantizada. Para las aleaciones que incorporaban cobre en su composición se utilizó cobre de conductores eléctricos.

Con el objeto de garantizar una limpieza del caldo se desescoriaba tanto en el horno como en cuchara, lo que garantizaba la ausencia de inclusiones de escoria en las probetas.

Los bebederos y mazarotas estaban calculados para evitar rechupes en las piezas, su sobredimensionamiento minimizaba la porosidad y proporcionaba probetas sanas de alta capacidad y muy buen acabado superficial.

La temperatura de colada se determinaba mediante termopar de platino-rodio (10%)/platino, de inmersión, provisto de funda de grafito.

Una vez coladas las probetas se dejaban enfriar en los moldes de arena durante un tiempo de tres horas, sacándose posteriormente al aire.

Dadas las dimensiones de los moldes este enfriamiento conducía a temperaturas inferiores a los 200°C en las piezas tras las roturas de los moldes.

3.2. Preparación y ensayo de las probetas.

Una vez enfriadas las probetas hasta temperatura ambiente se procedía al corte de bebedero y mazarota mediante amoladora, evitando calentamientos que afectan a la microestructura de bruto de colada. El no emplear métodos de rotura bajo entalla fue debido a la alta tenacidad del material aún en el estado de bruto de colada.

Una vez libres las probetas del bebedero y la mazarota se cortaba, ya por rotura bajo entalla, las probetas al ser los canales de alimentación internos de menor sección que el bebedero.

Las probetas para estudios metalográfico se obtenían, en todos los casos, de los canales de alimentación internos del molde. El diámetro de estos canales, 15 mm, permitía el encapsulamiento de las probetas tras corte con refrigeración adecuada en la tronzadora metalográfico.

En cuanto a las probetas para análisis espectrográfico se realizaba un desbaste superficial en una lijadora de banda, provista de lija gruesa, como es habitual para este tipo de ensayos.

La preparación para el análisis metalográfico se realizó siempre de forma manual y evitando la lijas de grano grueso y las presiones excesivas, con objeto de evitar las consecuencias que la distorsión de la estructura tiene en estos aceros por efecto de la abrasión. Todo el desbaste se efectuó siempre en húmedo para minimizar dicho efecto.

El pulido también fue manual empleando alúmina de muy baja granulometría. El ataque, también manual, se realizaba a temperatura ambiente y con nital-3 como reactivo.

Los tiempos de ataque empleados eran cortos para evitar el rápido sobre ataque de la austenita manganosa, lo que conduce a coloraciones excesivas de la matriz en perjuicio de la observación del micro constituyente disperso.

La observación microscópica se realizaba en un microscopio metalográfico, con amplificación de hasta 1.000 aumentos y dotado de cámaras de video, análisis de imagen y polarizadores Normasky.

Se obtuvieron unas 500 fotomicrografías, aunque por razones obvias solo se incluyen en la tesis las más significativas en el Anexo II.

3.3. Análisis químico de las coladas.

La inexistencia de patrones de este tipo de aceros, no comercializados actualmente, obligó al análisis por vía húmeda clásica de la primera colada, así como por absorción atómica. La viruta necesaria se obtenía, dada la im mecanizabilidad de estos aceros, sometiendo al material a un tratamiento de perlización. Este tratamiento consiste en el calentamiento a 1.100°C del acero, enfriamiento al aire o al agua en función del espesor, y un mantenimiento prolongado (unas 8 horas) a temperaturas entre 700-800°C.

Con este tratamiento se obtiene una microestructura totalmente perlítica con carburos globulizados en el borde de grano. Es decir, la austenita metaestable se transforma en perlita y se disuelve la red de carburos intergranular típica de bruto de colada, reduciéndose significativamente la fragilidad al tiempo que se reduce la resistencia al desgaste. En este estado es posible la mecanización de estos aceros, mediante herramienta adecuada.

Una vez desengrasada la viruta es posible el análisis químico convencional y por absorción atómica. Probetas de colada analizadas de esta forma sirvieron posteriormente como patrones internos para el análisis por espectrometría de emisión del resto de coladas, encontrándose una excelente correlación entre análisis efectuados de una y otra forma.

3.4. Tratamiento térmico del acero.

Con objeto de estudiar la estabilidad de la austenita de esta familia de aceros, por calentamientos variables entre los 100° y los 900°C, se efectuó un barrido de tratamientos térmicos entre dichas temperaturas, decaladas 50°C, de 2h de duración para cada una de las 10 coladas. Este tratamiento se efectuaba después de realizar, en todos los casos, un hipertemple al aire desde 1.100°C con 2h de permanencia según el esquema de la figura 3.4.1.

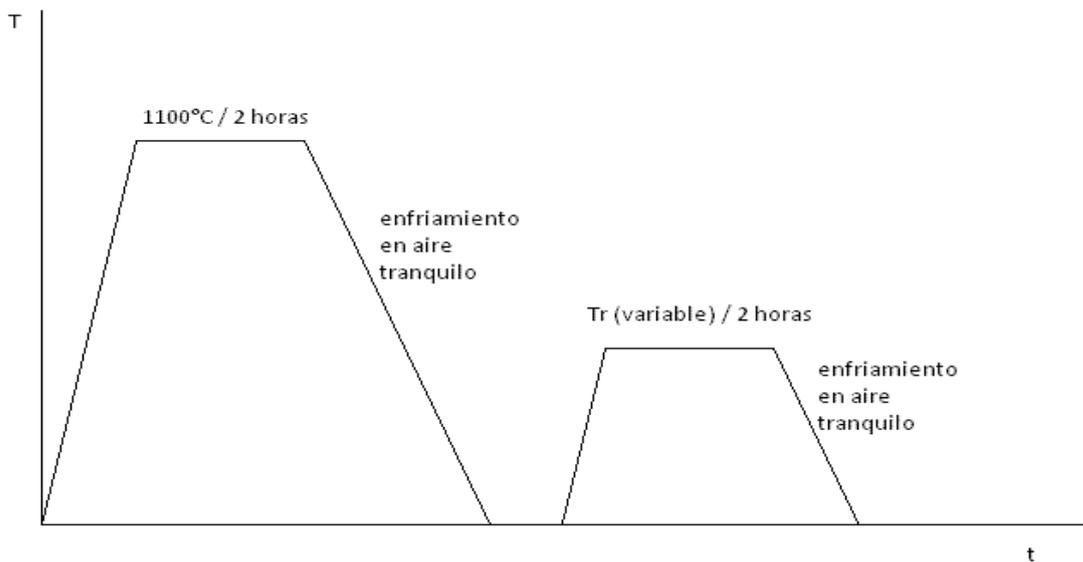


Figura 3.4.1. Tratamientos térmicos

En el caso del acero Hadfield el hipertemple habitual industrialmente se realizaba desde temperaturas de 1.050-1.100 °C con enfriamiento al agua, con objeto de lograr una adecuada solubilización de los carburos e impedir su posterior precipitación por enfriamientos más lentos.

En esta tesis se ha comprobado que con una composición química debidamente balanceada el enfriamiento al aire es suficiente para evitar la precipitación, hasta para espesores del orden de los 100-150 mm. Un acero Hadfield requeriría con dicho espesor el enfriamiento en agua, es decir, esta familia de aceros es menos sensible al espesor que el acero Hadfield típico.

El tiempo de 2 horas es también suficiente para lograr una solubilización correcta, siendo necesarios tiempos muy superiores para la disolución total, pero estos tiempos no tendrían aplicación industrial.

Los fenómenos de descarburación superficial no afectan significativamente a estos aceros para los tiempos de estancia a la temperatura de hipertemple utilizados, incluso en hornos de mufla carentes de atmósfera protectora. Este hecho fue comprobado por el análisis químico del carbono en la superficie de probetas.

Tras el tratamiento térmico (hipertemple más calentamiento posterior) se efectuaba el análisis metalográfico de las probetas, y se obtenía su dureza.

Diferentes pruebas efectuadas indicaban que a todas las temperaturas, tras 2 horas de duración, se obtenía una considerable descomposición de la austenita y que la transformación se estabilizaba para tiempos muy inferiores a las 10 horas. Es obvio que para el estudio de la cinética de transformación de la austenita 2 horas son por tanto suficientes, dado el orden de magnitud del tiempo real en servicio.

La evaluación de la descomposición de la austenita en tiempo real de servicio se realizó incrementando las temperaturas de tratamiento muy por encima de las habituales en los molinos, de manera que se puedan establecer equivalencias entre distintos pares de temperaturas y tiempos.

Tanto los parámetros de Larson-Miller (LMP) para fluencia en aceros como Holomon-Jaffe (JJP) para equivalencias en revenidos se basan en que la cinética de los procesos viene controlada por una ecuación tipo Arrhenius

$$\dot{\epsilon} = A \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$$

Donde $\dot{\epsilon}$ es la tasa de fluencia en LMP o la de transformaciones difusivas en el revenido en JJP, E la energía de activación del mecanismo, k la constante de Boltzmann y T la temperatura Kelvin. Tomando logaritmos obtenemos

$$\ln(A) - \ln(\dot{\epsilon}) = \frac{E}{kT}$$

suponiendo que la tasa de fluencia es constante

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_r}{t_r}$$

con ϵ_r la elongación a la rotura y t_r el tiempo hasta la misma. Sustituyendo tenemos

$$\ln(A) - \ln(\varepsilon_r) + \ln(t_r) = \frac{E}{kT}$$

y agrupando los logaritmos de A y ε_r en una constante K queda

$$(K + \ln(t_r))T = \frac{E}{k}$$

o su forma más conocida

$$LMP = T(C + \log(t))$$

donde LMP o su equivalente JJP son parámetros que indican procesos con pares de temperatura y tiempo de consecuencias equivalentes en el material.

Dado que la cinética de todos los procesos que estamos estudiando está controlada por una cinética de tipo difusivo, debe por tanto estar controlada por una ecuación de este tipo. Lo que no se puede asegurar es que el valor de la constante sea semejante a la que se emplea en revenidos ya que estamos ante procesos distintos.

En cualquier caso, al asegurarnos que para temperaturas elevadas en tiempos de dos horas se puede evitar una descomposición importante de la austenita estamos asegurando igualmente que para temperaturas medias o bajas y tiempos largos de permanencia.

3.5. Pruebas en servicio.

Se han descrito algunos tipos de ensayos desarrollados para intentar simular la abrasión y el desgaste, con diferente grado de severidad, en numerosas aplicaciones industriales. Sin embargo, y al igual que en los ensayos de corrosión, muchos de estos ensayos no proporcionan ni siquiera valores válidos cualitativamente.

Con objeto de valorar cuantitativamente la resistencia al desgaste de estas aleaciones se decidió, contando con la colaboración de una empresa productora de electricidad, instalar cuñas fabricadas con dos aleaciones de las diez estudiadas en un molino de bolas para carbón. Estas dos aleaciones se juzgarán como las más convenientes en función de los estudios previos.

Se fabricaron cuñas de morfología idéntica a las originales del molino junto a cuñas convencionales fabricadas con el material comercial usual para esta aplicación. Todas las cuñas, de uno y otro material, se encontraban debidamente marcadas con objeto de hacer el estudio individual.

El número total de cuñas montadas fueron de 10 de cada una de las coladas seleccionadas, y el número de cuñas convencionales, utilizadas como referencia fue igualmente de 10.

El tiempo en servicio fue de 25 meses realizándose un control intermedio de la pérdida de peso sufrida, aprovechando paradas cortas en el molino motivadas por incidencias en el servicio.

Al cabo de los 25 meses se desmontaron todas las cuñas, experimentales y de referencia, para efectuar el estudio individual de todas ellas, tanto en cuanto a la pérdida de peso como a los perfiles de desgaste obtenidos mediante inspección visual para comprobar que no existiese deformación plástica macroscópica que impidiese el funcionamiento de las cuñas sin pérdida de masa.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.1. Análisis químico de las coladas.

Como se indicó anteriormente la primera colada que se efectuó tenía una composición química similar a la propuesta por la Climax, aunque dicha compañía por motivos evidentes tampoco era suficientemente explícita en la clasificación empleada. Desde el primer momento se consideró conveniente la adición de cobre para reducir la inestabilidad de la austenita a temperaturas bajas y medias y de cromo para permitir velocidades de enfriamiento menores en el hipertemple, evitándose así la formación de grietas en el tratamiento.

Las modificaciones siguientes para la obtención del resto de las coladas no fueron aleatorias, se realizaron en función de los resultados de las pruebas de laboratorio obtenidas en las coladas previas. Se realizaron un total de 10 coladas con las composiciones químicas recogidas en la Tabla 4.1.

Colada	C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	1,5	8	0,5	2	2	1
2	1,3	6	0,5	2	1,5	2
3	1,3	6	0,65	3	1,1	0
4	1	5	0,5	3	1,5	0
5	1,5	4	0,5	3	2	0
6	1,5	6	0,2	3	2	0
7	1,7	7	0,5	2	2	1
8	1,7	6	0,3	2	1,5	1
9	1,8	8	0,5	2	2	1,5
10	1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Tabla 4.1. Composición química de las coladas

En todas las coladas el fósforo y el azufre se mantuvieron por debajo de 0,03%

4.2. Durezas en estado tratado

El estudio metalográfico de cada una de las 10 coladas en los distintos estados de tratamiento se completó con la medida de la dureza. Se tomaron cinco medidas de dureza brinell con bola de 10 mm y 3000 kg.

La toma de durezas en estos aceros es bastante importante ya que nos permite estimar indirectamente de manera cualitativa la descomposición de la austenita en otros constituyentes. Esta austenita es con mucho el constituyente más blando de estos aceros y, por tanto, cualquier incremento significativo de dureza por encima de los 220-250 HB en ausencia de endurecimiento por deformación se puede interpretar como algún tipo de descomposición de la austenita.

Los resultados de las medidas individuales se encuentran en el Anexo I. Se muestra un resumen con las medias de la dureza de cada colada y tratamiento en la tabla 4.2.

Col.	HT	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
1	224	245	264	225	229	224	231	230	230	229	262	265	267	236	266	259	281	262
2	227	254	304	236	227	229	235	224	227	233	279	268	292	259	274	254	256	292
3	231	317	303	234	231	229	265	230	233	233	282	328	429	417	362	313	297	299
4	544	510	426	381	356	363	373	376	365	378	428	502	421	414	373	537	513	491
5	283	242	313	228	235	227	251	244	243	234	297	381	565	484	587	584	357	263
6	408	254	300	268	230	263	254	247	329	228	287	348	319	371	388	360	359	311
7	240	331	335	241	262	244	247	243	254	265	339	331	333	296	282	292	339	337
8	257	320	262	239	248	230	258	265	251	261	309	369	381	280	344	329	333	268
9	226	289	312	260	248	233	258	258	249	255	319	313	333	285	321	321	331	303
10	227	331	352	283	248	241	313	265	283	254	299	341	404	337	348	355	355	287

Tabla 4.2. Media de las durezas de las muestras en distintos estados de tratamiento (HB)

Las medidas de dureza se han representado en la gráfica que se muestra en la figura 4.1 con la temperatura de recocido, correspondiendo el cero para la muestra hipertemplada y enfriada en aire sin recocido posterior.

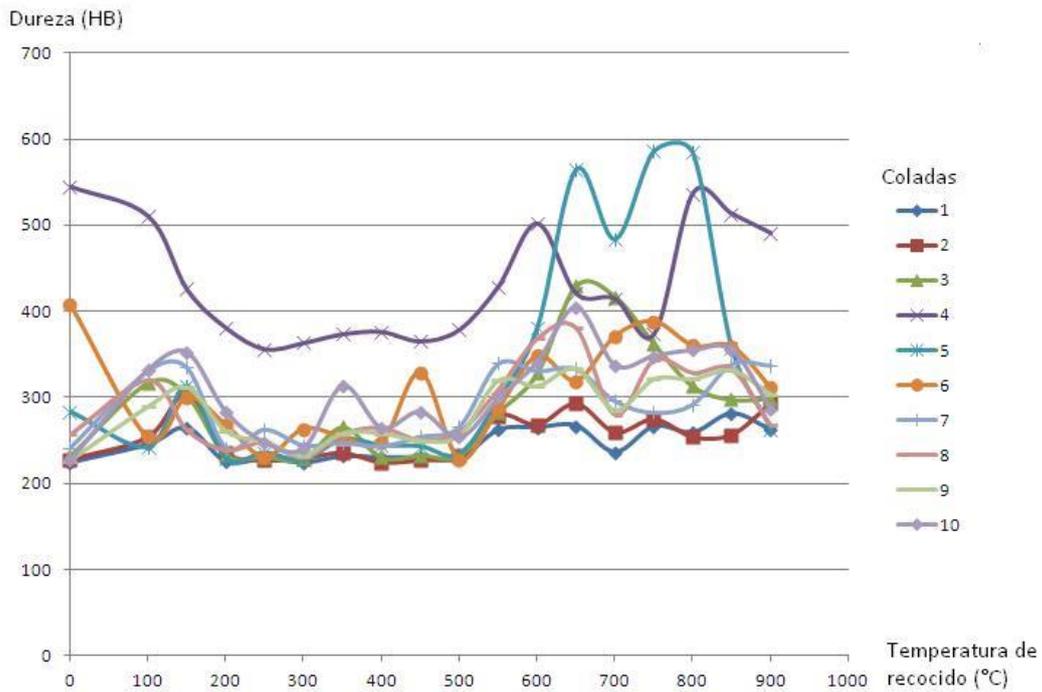


Figura 4.1. Durezas de cada colada tras tratamiento térmico

En la gráfica de la figura 4.2 se han eliminado aquellas coladas que tienen un comportamiento distinto debido a la formación masiva de constituyentes a partir de la austenita, con un comportamiento más similar al de un acero de herramientas indeformable que a un austenítico al manganeso, para poder observar más claramente el comportamiento general de este último tipo de aceros.

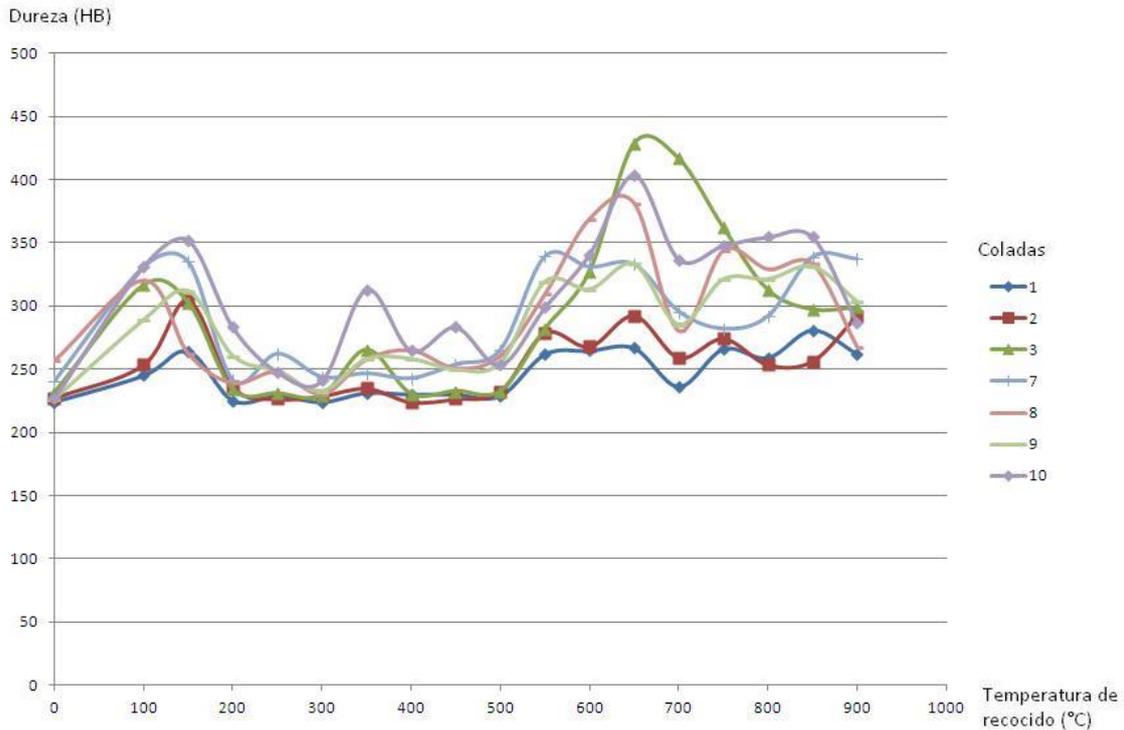


Figura 4.2. Dureza de las coladas más significativas tras tratamiento

Se observa en todas las aleaciones un ligero endurecimiento en el tratamiento a 100-150 °C, y uno más acusado a partir de los 550 °C excepto para las coladas 1 y 2, que mantienen durezas inferiores a los 300 HB en esta zona. Este endurecimiento es debido a la formación de nuevos constituyentes y se estudiará en el análisis metalográfico de las probetas.

El endurecimiento generalizado de baja temperatura puede ser explicado por los mismos mecanismos que tienen lugar en el revenido de aceros de gran resistencia, una precipitación fina de carburos que, al calentarse a temperatura superior van a coalescer, desapareciendo el efecto de los mismos.

De igual manera se observa que las coladas 7 y 9 tienen un comportamiento bastante próximo a las 1 y 2, pero con durezas ligeramente superiores.

De lo observado en la gráfica de durezas parece que podemos concluir que los niveles de manganeso más altos entre las composiciones elegidas permiten mantener durante más tiempo y más temperatura a la austenita sin transformación y evitar su acondicionamiento, hecho necesario para permitir el trabajo dentro del molino.

Además se puede observar que son las aleaciones 1 y 2 las que menores valores de dureza tienen en casi cualquier estado.

4.3. Observación de las micrografías.

De la observación de las metalografías de las probetas tras el tratamiento se justifican estos aumentos de dureza por la transformación de la austenita en otros constituyentes. Las imágenes más significativas se encuentran en el Anexo II.

La primera clasificación que podemos hacer es la de los aceros es en función de su estructura hipertemplada. Mientras las coladas 4 y 6 presentan una gran cantidad de martensita y la 5 presenta gran cantidad de perlitas y bainitas. Esto descalifica estas aleaciones para el trabajo.

Las otras coladas presentan una gran cantidad de austenita retenida, con algunos casos de carburos aislados precipitados en posiciones interdendríticas y algunas islas de otros constituyentes en el interior de las dendritas, aceptables en todos los casos.

Como se comentó en el apartado anterior, el endurecimiento que sucede en todos los casos entre 100 y 200 °C puede explicarse por el mismo efecto que sucede en el revenido de los aceros a las mismas temperaturas, pero este no es visible en microscopía óptica. Como tampoco se aprecian cambios entre las micrografías a estas temperaturas la observación apoya esta teoría.

Con temperaturas superiores los aceros menos estables comienzan a dar bainitas por descomposición de la austenita metaestable, inferiores a bajas temperaturas y superiores a temperaturas medias. La cantidad de bainitas es escasa y su distribución en islas como constituyente disperso, por lo que su influencia salvo en caso de la colada 10 sobre la dureza es baja.

Las mayores transformaciones en casi todas las coladas las composiciones se da entre 550 y 900 °C. Tras el tratamiento a estas temperaturas aparecen constituyentes laminares y carburos precipitados en la estructura. Esto se traduce en el incremento de dureza que muestran las gráficas del apartado anterior. Incluso en algunas aparece un endurecimiento sin formación de nuevos constituyentes, lo que puede ser posible por mecanismos semejantes a la dureza secundaria de los aceros de herramientas de alta aleación.

También aparece martensita nueva en algunas de las coladas. A estas temperaturas la precipitación de carburos y la difusión inversa pueden empobrecer la austenita en carbono y elementos de aleación "acondicionándola". Este efecto es similar al que ocurre en aceros de herramientas con austenitas muy estables durante el primer revenido.

Esta austenita acondicionada produce durante el enfriamiento martensita que elevan su dureza y fragilizan el acero. Se observa que este efecto es máximo en torno a los 600-750 °C. A temperaturas más bajas la difusión es mucho más lenta y a temperaturas superiores la tendencia es ya a la redisolución de los posibles precipitados y la homogeneización de la austenita. El mayor efecto se da en la colada 5, la de menor contenido en manganeso.

A partir de los mencionados 750 °C vuelven a aparecer lagunas de austenita retenida en los antiguos espacios interdendríticos, más abundantes según aumenta la temperatura tal y como corresponde a la reentrada en la zona trifásica de austenita, ferrita y carburos.

4.4. Selección de las composiciones a ensayar en servicio.

Para un buen comportamiento en servicio en un molino de carbón, un acero austenítico al manganeso debe tener en primer lugar una estructura fundamentalmente austenítica a la temperatura del molino durante todo el tiempo de servicio.

Además de para asegurar la tenacidad de las cuñas y evitar que se quiebren de manera frágil por el impacto de las bolas, la estructura austenítica es necesaria para asegurar el endurecimiento durante el trabajo típico de estas aleaciones.

Hemos demostrado que para asegurar la austenita durante tiempos largos en el molino el acero ha de mantener la dureza baja a temperaturas superiores a las de trabajo durante tiempo corto, estimado en dos horas de tratamiento.

Para asegurar la tenacidad de las cuñas en el molino ha de asegurarse también que no existe peligro de que un microconstituyente de carácter frágil aparezca en la estructura del material y que por crecimiento masivo pueda disminuir excesivamente la tenacidad del mismo.

Las aleaciones 1 y 2 con las que de, entre las analizadas en el presente trabajo, mejor se adecuan a los requisitos anteriores.

4.5. Resistencia al desgaste en servicio.

Con las composiciones de las coladas 1 y 2 se fabricaron 20 cuñas, 10 de cada tipo, y se instalaron junto a otras 10 de material de referencia (colada 0) en tres molinos (designados A, B y C).

Las cuñas fueron debidamente marcadas y pesadas antes de la instalación, y posteriormente se volvieron a pesar en dos ocasiones más después del funcionamiento en servicio. Los resultados de dichas pesadas se recogen en la tabla 4.3.

Ahora bien, aunque la pérdida de peso porcentual es una variable importante para describir el comportamiento en servicio de las cuñas, no refleja completamente aquél. De hecho, la variación dimensional de la cuña puede ser un factor que la inhabilite para el servicio, pues es sabido que materiales de baja dureza y alta plasticidad pueden sufrir pérdidas de peso mínimas y, sin embargo, alcanzar variaciones dimensionales muy altas.

En los materiales de baja dureza sometidos a procesos de desgaste el material fluye desde las zonas de trabajo hacia las adyacentes sin experimentar pérdidas de peso, pero quedando la pieza inutilizada para el servicio por los cambios geométricos. Por ello se decidió evaluar la variación morfológica de cada una de las piezas.

Se realizó una inspección visual y fotografías de cada cuña después del final del ensayo, observándose en todas ellas la ausencia de deformación plástica y una morfología del desgaste similar a las de las cuñas habituales. Algunas de las fotografías de las cuñas tras el trabajo se recogen en el Anexo III

Mol.	Col.	P Ini. (kg)	T Par. (h)	P. Par. (kg)	Dif (kg)	Dif (%)	Vel. (mg/h)	T. Tot. (h)	P. Fin. (kg)	Dif (kg)	Dif (%)	Vel. (mg/h)
A	0	18,724	1976	18,332	0,392	2,09%	198,38	10405	16,622	2,102	11,23%	202,02
A	0	18,294	1976	17,861	0,433	2,37%	219,13	10405	16,030	2,264	12,38%	217,59
A	0	18,987	1976	18,627	0,360	1,90%	182,19	10405	16,864	2,123	11,18%	204,04
A	0	18,805	1976	18,388	0,417	2,22%	211,03	10405	16,267	2,538	13,50%	243,92
A	1	18,815	1976	18,434	0,381	2,02%	192,81	10405	16,340	2,475	13,15%	237,87
A	1	18,642	1976	18,330	0,312	1,67%	157,89	10405	16,418	2,224	11,93%	213,74
A	1	18,930	1976	18,590	0,340	1,80%	172,06	10405	16,664	2,266	11,97%	217,78
A	1	18,728	1976	18,318	0,410	2,19%	207,49	10405	16,109	2,619	13,98%	251,71
A	2	19,170	1976	18,921	0,249	1,30%	126,01	10405	17,466	1,704	8,89%	163,77
A	2	19,232	1976	19,010	0,222	1,15%	112,35	10405	17,528	1,704	8,86%	163,77
A	2	18,983	1976	18,609	0,374	1,97%	189,27	10405	16,484	2,499	13,16%	240,17
A	2	19,277	1976	19,005	0,272	1,41%	137,65	10405	17,087	2,190	11,36%	210,48
B	0	18,444	3644	17,563	0,881	4,78%	241,77	11991	15,984	2,460	13,34%	205,15
B	0	18,295	3644	17,588	0,707	3,86%	194,02	11991	15,844	2,451	13,40%	204,40
B	0	18,589	3644	17,849	0,740	3,98%	203,07	11991	16,352	2,237	12,03%	186,56
B	0	18,510	3644	17,890	0,620	3,35%	170,14	11991	16,542	1,968	10,63%	164,12
B	1	18,899	3644	18,181	0,718	3,80%	197,04	11991	16,142	2,757	14,59%	229,92
B	1	18,893	3644	18,135	0,758	4,01%	208,01	11991	15,831	3,062	16,21%	255,36
B	1	18,816	3644	18,172	0,644	3,42%	176,73	11991	16,323	2,493	13,25%	207,91
B	1	18,999	3644	18,328	0,671	3,53%	184,14	11991	16,005	2,994	15,76%	249,69
B	2	19,054	3644	18,567	0,487	2,56%	133,64	11991	17,000	2,054	10,78%	171,30
B	2	19,186	3644	18,580	0,606	3,16%	166,30	11991	16,737	2,449	12,76%	204,24
B	2	18,903	3644	18,330	0,573	3,03%	157,24	11991	16,209	2,694	14,25%	224,67
B	2	18,834	3644	18,241	0,593	3,15%	162,73	11991	16,637	2,197	11,67%	183,22
C	0	17,050	6119	15,552	1,498	8,79%	244,81	18110	13,534	3,516	20,62%	194,15
C	0	17,308	6119	15,474	1,834	10,60%	299,72	18110	13,226	4,082	23,58%	225,40
C	1	16,771	6119	15,447	1,324	7,89%	216,38	18110	13,029	3,742	22,31%	206,63
C	1	16,898	6119	15,541	1,357	8,03%	221,77	18110	13,027	3,871	22,91%	213,75
C	2	16,427	6119	15,371	1,056	6,43%	172,58	18110	13,299	3,128	19,04%	172,72
C	2	16,718	6119	15,613	1,105	6,61%	180,59	18110	13,544	3,174	18,99%	175,26

Tabla 4.3. Resultados de desgaste en los ensayos en los molinos de carbón.

4.5.1. Contraste de hipótesis con desigualdad de varianzas.

Para observar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las velocidades de de desgaste de las tres aleaciones ensayadas se realizó un contraste de hipótesis dos a dos, con una hipótesis nula de igualdad entre las medias y una alternativa de medias distintas. Para aprovechar todos los datos disponibles la vida de cada cuña se divide en dos experimentos, uno desde el peso inicial hasta el intermedio y otro del intermedio hasta el final, obteniéndose los datos de velocidad de desgaste de la tabla 4.4.

A partir de estos se procede a obtener un intervalo de confianza para la diferencia de medias, que se distribuye según una t de Student (test de Welch).

Como las varianzas son distintas se procede a estimar la varianza conjunta como la suma de las otras dos y los grados de libertad aproximados con la ecuación de Welch-Satterthwaite.

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}\right)^2}{\frac{s_1^4}{N_1^2 \cdot \nu_1} + \frac{s_2^4}{N_2^2 \cdot \nu_2}} = \frac{\left(\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}\right)^2}{\frac{s_1^4}{N_1^2 \cdot (N_1 - 1)} + \frac{s_2^4}{N_2^2 \cdot (N_2 - 1)}}$$

Empleando estos grados de libertad y un nivel de significación $\alpha = 0,05$ se obtiene el valor de la t y se construye el intervalo de confianza para la diferencia de las medias (test de Welch).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}}$$

En las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran unos resúmenes de los resultados del contraste de hipótesis, así como una estimación de la velocidad de desgaste para cada una de las tres aleaciones con su variabilidad esperada.

De estos datos podemos observar que la velocidad de desgaste de la aleación 2 es significativamente menor que los de las aleaciones 1 y 0 mientras que las diferencias entre la 0 y la 1 no lo son.

Colada 0	Colada1	Colada 2
198,38	192,81	126,01
219,13	157,89	112,35
182,19	172,06	189,27
211,03	207,49	137,65
241,77	197,04	133,64
194,02	208,01	166,30
203,07	176,73	157,24
170,14	184,14	162,73
244,81	216,38	172,58
299,72	221,77	180,59
202,87	248,43	172,62
217,23	226,84	175,82
209,16	228,50	252,11
251,63	262,07	227,55
189,17	244,28	187,73
208,94	276,03	220,80
179,35	221,52	254,10
161,50	278,30	192,16
168,29	201,65	172,80
187,47	209,66	172,55

Tabla 4.4. Resumen de las velocidades de desgaste en los ensayos

$$H_0 = \text{med}(x_1) - \text{med}(x_0) = 0 \text{ (mg/h)}$$

	Colada 0		Colada 1
Med	206,99		216,58
Var	1094,03		1101,74
N	20		20
EE(x)	7,40		7,42
EE(x1-x2)		10,48	
GI		38,00	
t(0,975,gl)		2,34	
IC		-9,59	± 24,48

Tabla 4.5: Contraste de hipótesis de velocidades de desgaste entre las coladas 0 y 1

$$H_0 = \text{med}(x_2) - \text{med}(x_0) = 0 \text{ (mg/h)}$$

	Colada 0		Colada 2
med	206,99		178,33
var	1094,03		1448,73
N	20		20
EE(x)	7,40		8,51
EE(x1-x2)		11,28	
GI		37,27	
t(0,975,gl)		2,34	
IC		28,66	± 26,34

Tabla 4.6: Contraste de hipótesis de velocidades de desgaste entre las coladas 0 y 2

$$H_0 = \text{med}(x_2) - \text{med}(x_1) = 0 \text{ (mg/h)}$$

	Colada 1		Colada 2
Med	216,58		178,33
Var	1101,74		1448,73
N	20		20
EE(x)	7,42		8,51
EE(x1-x2)		11,29	
GI		37,31	
t(0,975,gl)		2,34	
IC		38,22	± 26,38

Tabla 4.7: Contraste de hipótesis de velocidades de desgaste entre las coladas 1 y 2

4.5.2. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada

Para completar el resultado anterior se realizan análisis de la varianza simple y múltiple a los datos recogidos en el estudio anterior, comenzando por la variable colada. Utilizaremos de nuevo de nuevo los datos de la tabla 4.4 para este análisis.

Col.	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
0	20	206,993	33,0761	15,9793%	161,495	299,722	138,227
1	20	216,58	33,1925	15,3258%	157,895	278,304	120,409
2	20	178,33	38,0622	21,3437%	112,348	254,103	141,755
Total	60	200,634	37,9761	18,928%	112,348	299,722	187,374

Col.	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
0	2,15603	1,78647
1	0,532297	-0,357804
2	0,841402	0,0752801
Total	0,777469	0,226698

Tabla 4.8 Resumen Estadístico para Velocidad de desgaste (mg/h)

La tabla 4.8 muestra diferentes estadísticos para la velocidad de desgaste para cada una de las 3 coladas. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, listados aquí bajo la columna de Promedio, pero como el sesgo estandarizado se encuentra fuera del rango de -2 a +2 para la colada 0 indica algo de no normalidad significativa en los datos, lo cual viola el supuesto de que los datos provienen de distribuciones normales, no cumpliendo los requisitos previos de un estudio anova para un IC del 95%, pero si cumpliéndolo para un 97% o superior. El resto de datos y gráficos del estudio indicarán las causas de dicha falta de normalidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	15843,3	2	7921,63	6,52	0,0028
Intra grupos	69245,5	57	1214,83		
Total (Corr.)	85088,8	59			

Tabla 4.9 ANOVA para la velocidad de desgaste (mg/h) por Colada.

A pesar de la falta de normalidad la tabla ANOVA descompone la varianza de la velocidad de desgaste en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 6,52076, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor-P de la es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa de la media de la velocidad de desgaste entre una colada y otra, con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, realizaremos pruebas de múltiples rangos.

			<i>Error Est.</i>		
<i>Col.</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>(s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
0	20	206,993	7,79369	195,958	218,029
1	20	216,58	7,79369	205,544	227,615
2	20	178,33	7,79369	167,295	189,366
Total	60	200,634			

Tabla 4.10. Medias para la velocidad de desgaste con intervalos de confianza del 95,0%

La tabla 4.10 muestra la media de la velocidad de desgaste cada colada. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar conjunta entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se solaparán un 95,0% de las veces.

<i>Col.</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
2	20	178,33	X
0	20	206,993	X
1	20	216,58	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
0 - 1		-9,58627	22,0711
0 - 2	*	28,6631	22,0711
1 - 2	*	38,2494	22,0711

* indica una diferencia significativa.

Tabla 4.11. Pruebas de Múltiple Rangos para la velocidad de desgaste por colada.

La tabla 4.11 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la tabla muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la tabla superior se han identificado 2 grupos homogéneos. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten un mismo grupo. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,136464	0,872722

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
0 / 1	33,0761	33,1925	0,992999	0,9879
0 / 2	33,0761	38,0622	0,755163	0,5465
1 / 2	33,1925	38,0622	0,760487	0,5565

Tabla 4.12. Verificación de Varianza

El estadístico mostrado en la tabla 4.12 evalúa la hipótesis de que la desviación estándar de la velocidad de desgaste dentro de cada uno de las 3 coladas es la misma. De particular interés es el valor-P de la prueba de Levene. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. Como no hay P-valores por debajo de 0.05, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

Col.	Tamaño Muestra	Rango Promedio
0	20	32,95
1	20	38,2
2	20	20,35

Estadístico = 11,037 Valor-P = 0,00401176

Tabla 4.13. Prueba de Kruskal-Wallis para la velocidad de desgaste por colada.

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de velocidad de desgaste dentro de cada uno de las 3 coladas son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. A diferencia del contraste de medias, el contraste de medianas no requiere normalidad, por lo que el análisis de diferencia es correcto.

Col.	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
0	20	8	12	202,972	182,802	218,908
1	20	6	14	213,016	193,306	242,441
2	20	16	4	172,707	157,884	191,828

Total n = 60. Gran mediana = 197,708. Estadístico = 11,2 Valor-P = 0,00369786

Tabla 4.14. Prueba de la Mediana de Mood para la velocidad de desgaste por colada.

La tabla 4.14 de prueba de medianas de Mood evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Lo hace contando el número de observaciones en cada muestra, a cada lado de la mediana global, la cual es igual a 197,708. Puesto que el valor-P para la prueba de chi-cuadrada es menor que 0,05, las medianas de las muestras son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%. También se incluyen los intervalos del 95,0% de confianza para mediana, basados en los estadísticos de orden de cada muestra. Gracias a estos intervalos

podemos determinar que la mediana de la colada 2 es significativamente distinta a la de la 0 y la 1, mientras que no se puede determinar la desigualdad entre la 0 y la 1.

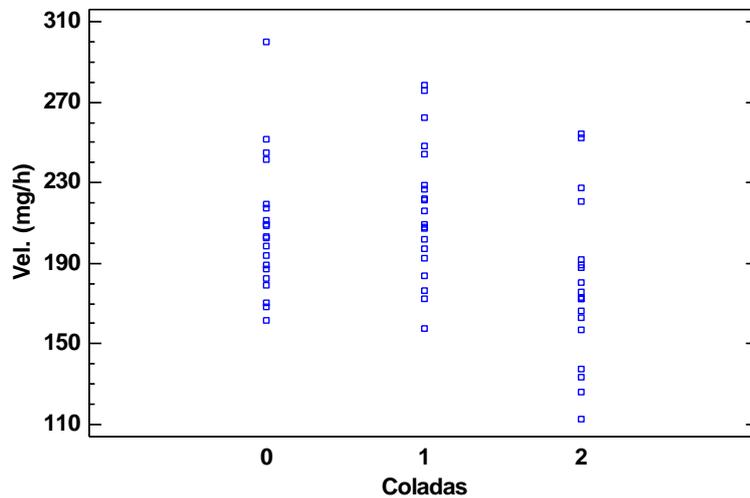


Figura 4.1 Dispersión de velocidades por colada.

La figura 4.1 muestra gráficamente la dispersión de los resultados de velocidad ordenados por coladas. En este gráfico podemos suponer la existencia de un valor atípico para la colada 0 que puede ser el causante de la falta de normalidad en los resultados de dicha colada que aparecen en la tabla 4.8. También podemos observar otros 3 valores de la colada 2 (dos superiores y uno inferior) que pueden ser atípicos.

La figura 4.2 muestra como el valor de velocidad de 299,7 mg/h para la colada 0 es claramente aberrante, mientras que los de 254,1 mg/h, 252,1 mg/h y 112,3 mg/h lo son para la colada 2, pero su número, su distancia y su simetría no afectan a la hipótesis de normalidad

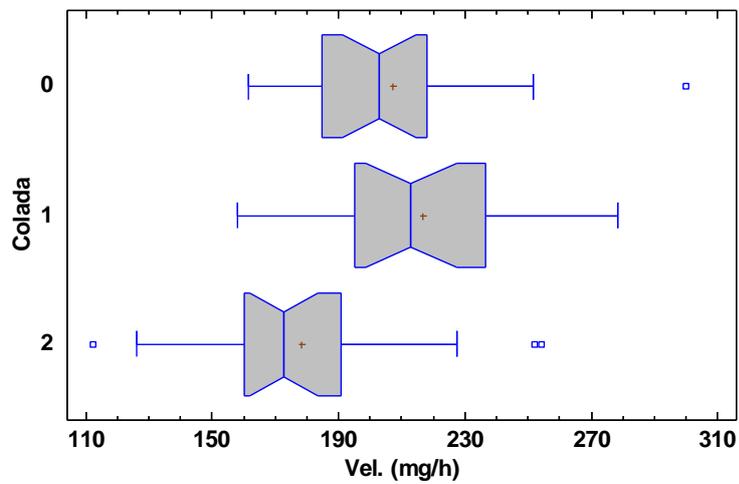


Figura 4.2 Gráfico de cajas y bigotes

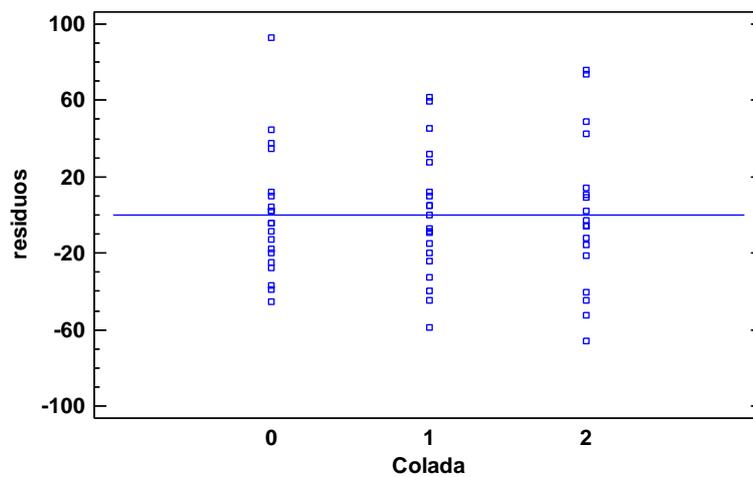


Figura 4.3 Gráfico de residuos.

Como se puede observar en gráfico de residuos de la figura 4.3, mientras el valor aberrante de la colada 0 es un valor claramente atípico, los de la colada 2 pueden corresponder a una varianza superior a las de las otras coladas. Por ello se repetirá el análisis de la varianza eliminando el valor atípico de la colada 0.

4.5.3. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada sin atípicos de colada 0.

Para lograr obtener unos resultados que cumplan con la hipótesis de normalidad al 95% eliminaremos el valor de 299,7 mg/h obtenido para la colada 0 por considerarlo un valor claramente atípico gracias al estudio anterior.

Col.	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
0	19	202,113	25,5336	12,6333%	161,495	251,631	90,1361
1	20	216,58	33,1925	15,3258%	157,895	278,304	120,409
2	20	178,33	38,0622	21,3437%	112,348	254,103	141,755
Total	59	198,955	35,9847	18,0868%	112,348	278,304	165,955

Col.	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
0	0,71294	-0,330564
1	0,532297	-0,357804
2	0,841402	0,0752801
Total	0,208691	-0,138154

Tabla 4.15 Resumen Estadístico para la velocidad de desgaste frente a la colada

Una vez retirado el valor atípico de la colada 0 su curtosis y su sesgo estandarizados tienen un valor absoluto claramente inferior a 2 por lo que podemos aceptar la probabilidad de que los datos se distribuyan de manera normal con IC del 95%. Observamos además que la eliminación de ese dato ha sido provechosa para la colada 0 ya que su promedio ha bajado de 207 mg/h hasta 202,1 mg/h aunque también su desviación ha disminuido de 33,1 mg/h a 25,5 mg/h, diferencia que se verá parcialmente compensada en el intervalo de confianza por la pérdida de un grado de libertad.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	14909,7	2	7454,83	6,94	0,0020
Intra grupos	60194,3	56	1074,9		
Total (Corr.)	75103,9	58			

Tabla 4.16 ANOVA para la velocidad de desgaste por colada.

En la tabla 4.16 podemos ver que a pesar de la mejora de la colada 0 existe aún una diferencia fuertemente significativa entre coladas, siendo según la tabla 17 claramente mejor la colada 2 a pesar de haber caído el límite inferior del intervalo de confianza de la colada 0 de 195,9 mg/h hasta 191,4 mg/h ya que sigue siendo superior al límite superior de la colada 2 que se sitúa en 188,7 mg/h.

Col.	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
0	19	202,113	7,52154	191,458	212,767
1	20	216,58	7,33109	206,195	226,964
2	20	178,33	7,33109	167,946	188,715
Total	59	198,955			

Tabla 4.17. Medias para la velocidad de desgaste con intervalos de confianza del 95,0%

Col.	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	20	178,33	X
0	19	202,113	X
1	20	216,58	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		-14,4667	21,0406
0 - 2	*	23,7827	21,0406
1 - 2	*	38,2494	20,7691

Método: 95,0 porcentaje LSD

* indica una diferencia significativa.

Tabla 4.18. Pruebas de Múltiple Rangos para la velocidad de desgaste por colada

Además podemos comprobar en la prueba de rangos de la tabla 4.18 que tampoco ahora la media de la velocidad de la colada 0 es significativamente distinta a la de la colada 1, mientras que la de la colada 2 sigue siendo inferior a la de la 0 y la 1.

También puede observarse en las tablas 4.19 y 4.20 que la mediana tiene un comportamiento semejante al anterior observado para las medias y, por tanto, al análisis anterior.

Col.	Tamaño Muestra	Rango Promedio
0	19	31,5263
1	20	38,2
2	20	20,35

Estadístico = 11,0221 Valor-P = 0,0040419

Tabla 4.19. Prueba de Kruskal-Wallis para la velocidad de desgaste por colada.

Col.	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
0	19	8	11	202,871	181,317	217,808
1	20	6	14	213,016	193,306	242,441
2	20	16	4	172,707	157,884	191,828

Total n = 59. Gran mediana = 197,036

Estadístico = 10,8599 Valor-P = 0,00438341

Tabla 4.20. Prueba de la Mediana de Mood para la velocidad de desgaste por colada.

Como puede apreciarse en la figura 4.4 la nueva dispersión de velocidades de desgaste es mucho más uniforme para la colada 0, no existiendo posibles valores atípicos. Este hecho se confirma en la figura 4.5 donde todos los valores para la colada 0 se encuentran dentro de los bigotes del gráfico.

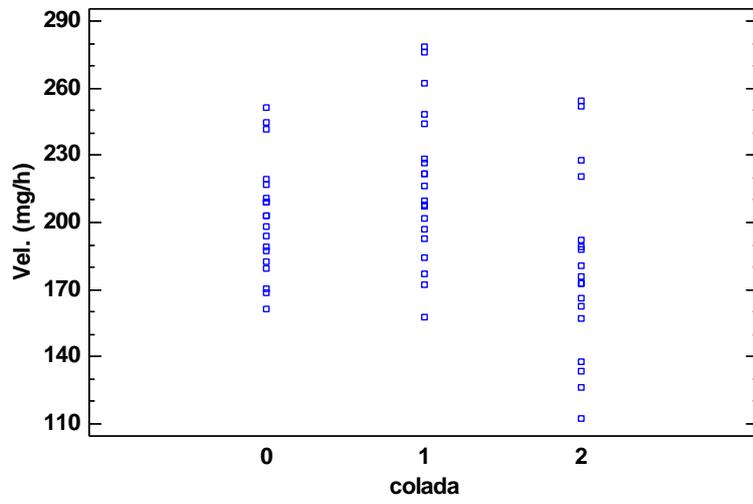


Figura 4.4. Dispersión de velocidades por colada.

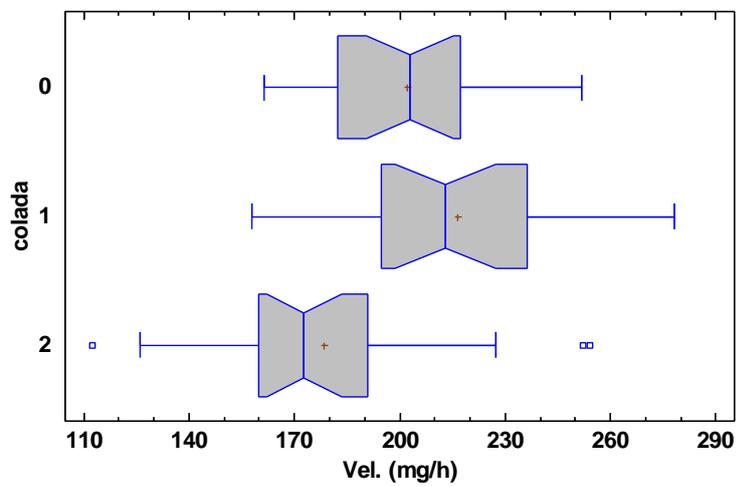


Figura 4.5 Gráfico de cajas y bigotes para la velocidad de desgaste por coladas.

4.5.4. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada sin atípicos de las coladas 0 y 2.

Para intentar eliminar los valores atípicos de la colada 2 se intentó en primer lugar eliminar el valor que es más desfavorable para ella, el de 112,3 mg/h, obteniéndose que con esta eliminación no desaparecen los valores superiores como atípicos como puede observarse en la figura 4.6.

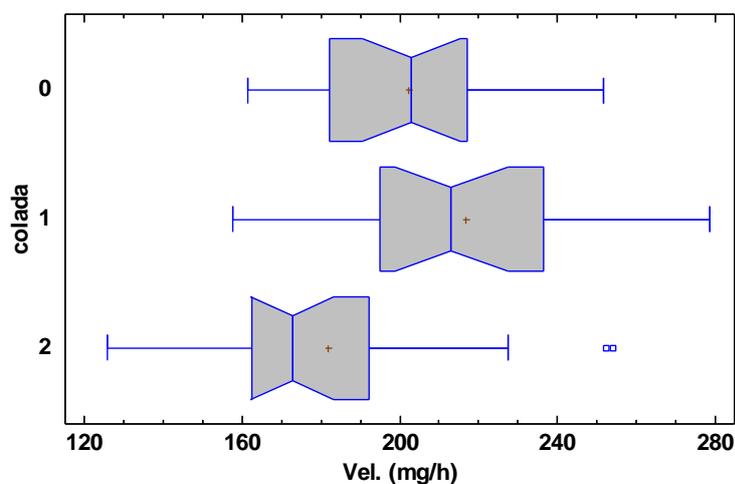


Figura 4.6. Gráfico de cajas y bigotes sin el valor inferior de la colada 2.

Se intentó eliminar también los dos valores superiores, aunque su eliminación favorecerá aún más el análisis para la colada 2, pero al realizarlo aparece un nuevo valor atípico que antes era válido como consecuencia de la reducción de la varianza como se puede observar en la figura 4.7.

Para evitar seguir eliminando datos que no harán más que concluir de nuevo la superioridad de la velocidad de desgaste de la colada dos daremos por bueno el anterior análisis de la varianza que es el más desfavorable posible para la colada que aparece como mejor en dicho análisis.

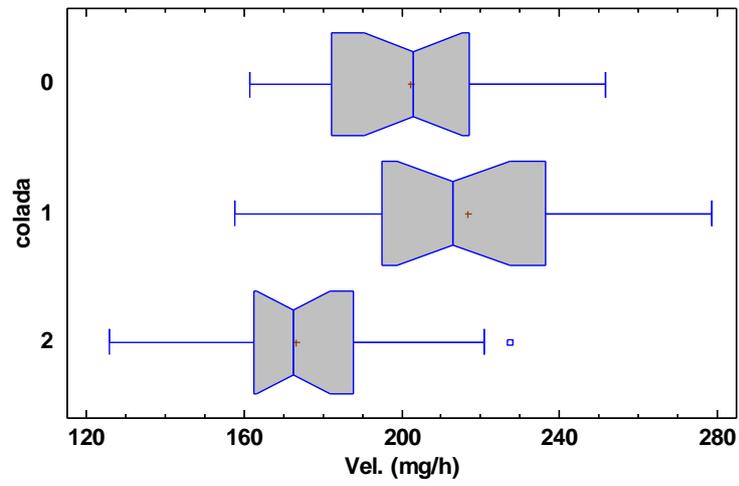


Figura 4.7. Gráfico de cajas y bigotes sin los 2 valores superiores ni el inferior de la colada 2.

4.5.5. ANOVA Velocidad relativa/Colada.

Para evitar la influencia de la masa inicial de las cuñas con la velocidad de desgaste másica se realizó un análisis semejante a los anteriores tomando como variable respuesta la velocidad de desgaste relativa (medida en tanto por uno por 10^{-6}) con respecto a la masa de cada cuña al inicio del ensayo. Utilizando de nuevo los datos de la tabla 4.3 y calculando las velocidades de desgaste relativas se puede observar en la tabla 4.21 la falta de normalidad semejante a la obtenida en el análisis de velocidad másica de la colada 0.

Col.	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
0	20	11,585	1,93136	16,6712%	9,02712	17,317	8,28986
1	20	12,0229	2,0023	16,654%	8,46984	15,2207	6,75086
2	20	9,80263	2,19953	22,4382%	5,84173	13,8627	8,02097
Total	60	11,1368	2,23337	20,0539%	5,84173	17,317	11,4752

Col.	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
0	2,63082	2,75761
1	-0,319986	-0,863153
2	0,0224261	-0,436416
Total	0,267519	0,438394

Tabla 4.21. Resumen Estadístico para la velocidad relativa por colada (1/h) · E-06

De nuevo si admitimos un IC del 98% en vez del 95% se puede admitir la normalidad de todos los datos de la colada 0, pero para situarnos como antes en la peor situación posible para la colada 2 eliminaremos el valor atípico elevado de la colada 0, obteniendo datos de normalidad ya adecuados presentados en la tabla 4.22.

Col.	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
0	19	11,2833	1,41985	12,5836%	9,02712	14,3584	5,33131
1	20	12,0229	2,0023	16,654%	8,46984	15,2207	6,75086
2	20	9,80263	2,19953	22,4382%	5,84173	13,8627	8,02097
Total	59	11,0321	2,09864	19,023%	5,84173	15,2207	9,37896

Col.	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
0	0,870455	0,070214
1	-0,319986	-0,863153
2	0,0224261	-0,436416
Total	-0,617293	-0,26234

Tabla 4.22. Resumen Estadístico para la velocidad relativa (1/h) · E-06 en función de la colada sin el valor atípico de la colada 0.

Con estos datos ya corregidos se continuó con el análisis de la varianza, observándose que de nuevo la diferencia entre las medias es significativa y con un grado de significación bastante elevado como puede comprobarse en la tabla 4.23

Para comprobar que los resultados de esta diferencia de medias coinciden con lo obtenido en los análisis anteriores se realiza de nuevo la prueba de rangos múltiples, cuyos resultados se listan en la tabla 4.24, donde comprobamos que otra vez se repiten los resultados de diferencias significativas entre la colada 2 y las demás y que no existen diferencias suficientemente significativas entre la 0 y la 1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	51,0656	2	25,5328	7,00	0,0019
Intra grupos	204,383	56	3,64969		
Total (Corr.)	255,448	58			

Tabla 4.23. Tabla ANOVA para la velocidad relativa (1/h) · E-06 por colada.

Col.	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	20	9,80263	X
0	19	11,2833	X
1	20	12,0229	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		-0,739626	1,22603
0 - 2	*	1,48067	1,22603
1 - 2	*	2,2203	1,21021

* indica una diferencia significativa. Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 4.24. Pruebas de Múltiple Rangos para la velocidad relativa (1/h) · E-06 por colada.

Las pruebas de la igualdad de medianas siguen el mismo camino, obteniéndose valores muy significativos para la desigualdad (Tabla 4.25) y nuevamente siendo significativamente distinta la colada 2 respecto a las demás (Tabla 4.26).

Col.	Tamaño Muestra	Rango Promedio
0	19	31,8947
1	20	37,5
2	20	20,7

Estadístico = 9,90851 Valor-P = 0,00705333

Tabla 4.25. Prueba de Kruskal-Wallis para la velocidad relativa (1/h) · E-06 por colada.

Col.	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
0	19	9	10	11,0665	10,4277	12,1297
1	20	7	13	12,3333	10,2686	13,4719
2	20	14	6	10,0408	8,356	11,2195

Estadístico = 5,03713 Valor-P = 0,0805752

Total n = 59. Gran mediana = 11,0101

Tabla 4.26. Prueba de la Mediana de Mood para la velocidad relativa (1/h) · E-06 por colada.

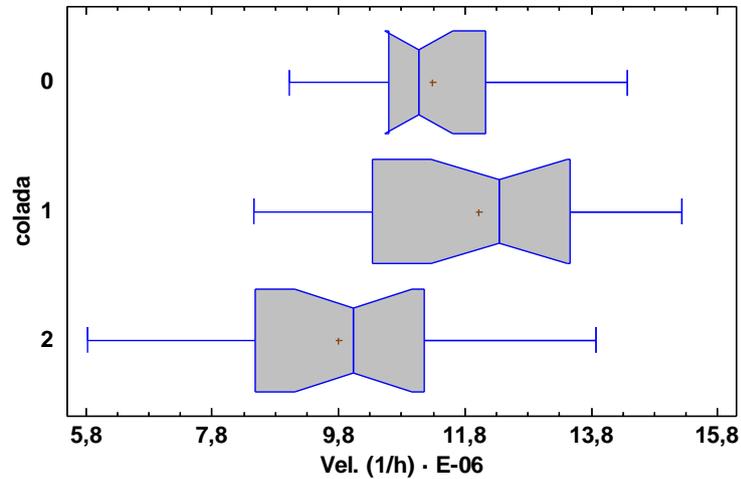


Figura 4.8. Gráfico de cajas y bigotes para la velocidad relativa por colada.

Además, como puede observarse en la figura 4.8, los valores extremos de la colada 2 no aparecen ya como atípicos, si bien es cierto que la varianza ha crecido bastante. A pesar de todo no se observan tendencias ni anomalías en la distribución de valores (figura 4.9) y de residuos (4.10) por lo que concluiremos que este análisis es también válido y confirma plenamente los resultados obtenidos en los análisis de velocidad másica.

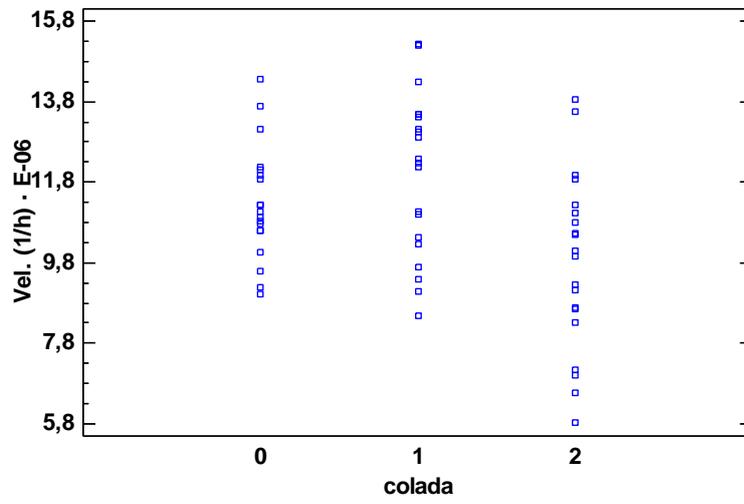


Figura 4.9. Distribución de velocidades relativas por colada.

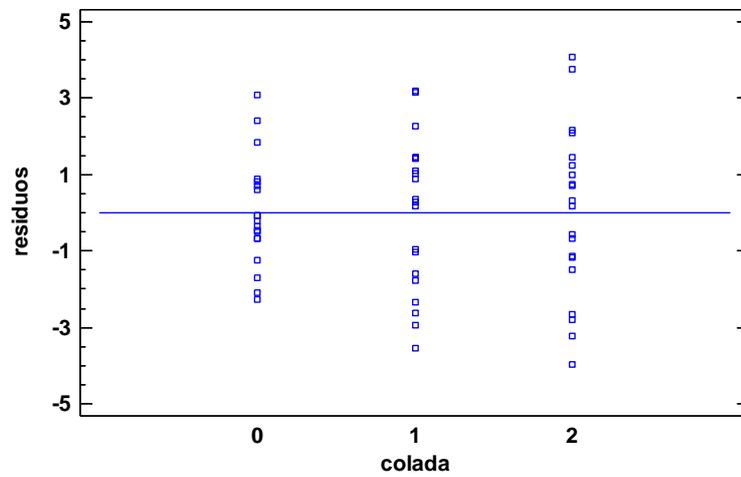


Figura 4.10. Distribución de residuos por colada.

4.5.6. ANOVA Velocidad de desgaste / Ensayo

Para comprobar la independencia de los resultados de velocidad de desgaste frente a si ha sido tomado en la primera parte de la vida de la cuña o en la parte final se realizó un estudio de la varianza empleando de nuevo los datos recogidos en la tabla 4.3.

Se crea una nueva categoría que llamaremos Ensayo, y asignaremos el valor 1 para aquellos ensayos que proceden del montaje inicial de las cuñas hasta la parada, y 2 para los ensayos realizados desde la parada hasta el final del experimento.

Comprobamos la hipótesis de normalidad de los datos según la nueva categoría, obteniéndose resultados favorables con un IC del 95% en los dos casos (Tabla 4.27).

Ensayo	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
1	29	184,043	32,4176	17,6142%	112,348	244,811	132,463
2	30	213,37	33,731	15,8087%	161,495	278,304	116,808
Total	59	198,955	35,9847	18,0868%	112,348	278,304	165,955

Ensayo	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
1	-0,601284	-0,115994
2	0,672557	-1,05967
Total	0,208691	-0,138154

Tabla 4.27. Resumen Estadístico para velocidad de desgaste (mg/h) por ensayo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	12683,0	1	12683,0	11,58	0,0012
Intra grupos	62421,0	57	1095,1		
Total (Corr.)	75103,9	58			

Tabla 4.28. Tabla ANOVA para velocidad de desgaste (mg/h) por ensayo

Al realizar el análisis de la varianza observamos en la tabla 4.28 que el orden del ensayo si tiene una fuerte influencia sobre el resultado del mismo, siendo significativa esta influencia hasta niveles de confianza muy altos (valores-P muy pequeños).

En la prueba de rangos múltiples (Tabla 4.29) podemos observar la gran diferencia existente entre los ensayos realizados en primer lugar con los realizados en segundo lugar.

ensayo	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	29	184,043	X
2	30	213,37	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-29,3276	17,2568

* indica una diferencia significativa Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 4.29. Pruebas de Múltiple Rangos para velocidad de desgaste (mg/h) por ensayo

Y de manera coherente con lo anterior, sucede con el análisis de la diferencia de medianas (Tabla 4.30) y sus límites significativos (Tabla 4.31).

ensayo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	29	23,3448
2	30	36,4333

Estadístico = 8,56299 Valor-P = 0,00342954

Tabla 4.30. Prueba de Kruskal-Wallis para velocidad de desgaste (mg/h) por ensayo

Ensayo	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
1	29	19	10	184,138	168,966	204,426
2	30	11	19	209,408	187,918	228,374

Estadístico = 4,9109 Valor-P = 0,0266848 Total n = 59. Gran mediana = 197,036

Tabla 4.31. Prueba de la Mediana de Mood para velocidad de desgaste (mg/h) por ensayo

Se realizan por último gráficos de valores (Figura 4.11), residuos (Figura 4.12) y cajas y bigotes (Figura 4.13), no observándose ninguna anomalía ni tendencia en los datos, por lo que el análisis se da por correcto

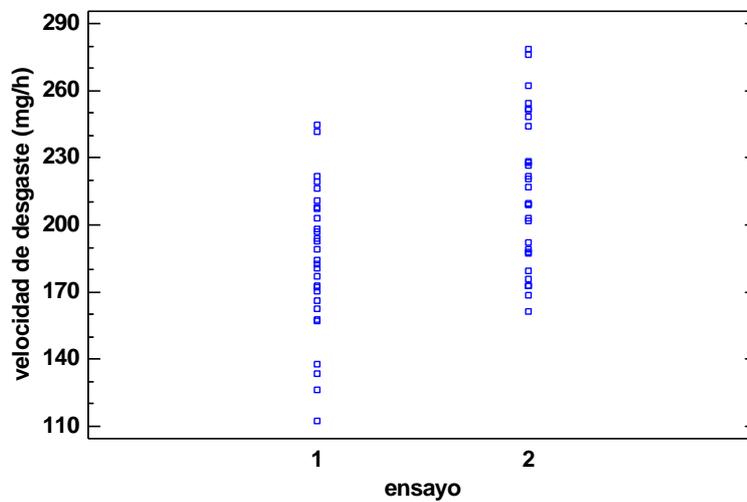


Figura 4.11 Distribución de valores de velocidad de desgaste por ensayo

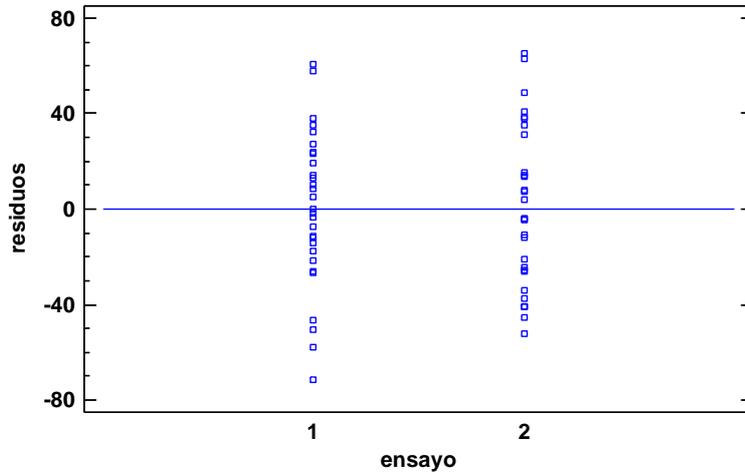


Figura 4.12. Gráfico de residuos.

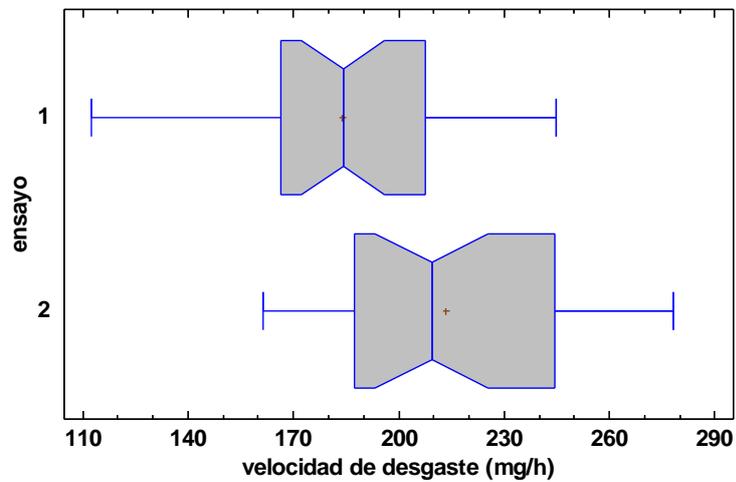


Figura 4.13. Gráfico de cajas y bigotes para la velocidad de desgaste por ensayo.

Una posible explicación para esta diferencia entre ensayos puede ser el menor peso inicial de las cuñas en el segundo ensayo, por lo se realizó a continuación un ensayo de la velocidad de desgaste relativa en función del ensayo.

4.5.7. ANOVA Velocidad relativa/Ensayo.

Tomando nuevamente los datos de la tabla 4.3 realizamos el análisis de normalidad, esta vez sobre la variable de velocidad relativa de desgaste, obteniéndose de nuevo resultados similares. En la tabla 4.31 podemos comprobar nuevamente la normalidad de los resultados de velocidad relativa separados por ensayo, mientras que en la tabla 4.32 nos ofrece un valor fuertemente significativo para la desigualdad de medias, más aun que en el análisis anterior.

ensayo	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
1	29	10,0167	2,01921	20,1584%	5,84173	14,3584	8,5167
2	30	12,0136	1,68654	14,0386%	9,02712	15,2207	6,19358
Total	59	11,0321	2,09864	19,023%	5,84173	15,2207	9,37896

ensayo	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
1	-0,0116141	-0,0357139
2	0,103795	-0,673679
Total	-0,617293	-0,26234

Tabla 4.31. Resumen Estadístico para vel. de desgaste (1/h) · E-06 por ensayo

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	58,7981	1	58,7981	17,04	0,0001
Intra grupos	196,65	57	3,45001		
Total (Corr.)	255,448	58			

Tabla 4.32. Tabla ANOVA para vel. de desgaste (1/h) · E-06 por ensayo

De igual manera, el ensayo de rangos múltiples (Tabla 4.33) y la prueba de la varianza (Tabla 4.34) concluyen que los ensayos realizados en segundo lugar tienen una tasa de desgaste significativamente más elevada independientemente del peso inicial de las cuñas y que el ensayo es válido.

Ocurre lo mismo en los análisis de la igualdad de medianas (Tabla 4.35) y rangos para estas (Tabla 4.36)

ensayo	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	29	10,0167	X
2	30	12,0136	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-1,99686	0,968595

* indica una diferencia significativa. Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 4.33. Pruebas de Múltiple Rangos para vel. de desgaste (1/h) · E-06 por ensayo

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,541775	0,464716

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
1 / 2	2,01921	1,68654	1,43342	0,3405

Tabla 4.34. Verificación de Varianza

ensayo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	29	21,5517
2	30	38,1667

Estadístico = 13,7989 Valor-P = 0,000203317

Tabla 4.35. Prueba de Kruskal-Wallis para vel. de desgaste (1/h) · E-06 por ensayo

ensayo	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
1	29	22	7	10,2479	8,96035	10,9506
2	30	8	22	12,0442	11,0534	13,3867

Estadístico = 14,2791 Valor-P = 0,000157605 Total n = 59 Gran mediana = 11,0101

Tabla 4.36. Prueba de la Mediana de Mood para vel. de desgaste (1/h) · E-06 por ensayo

Por último se realizaron los gráficos correspondientes de valores (Figura 4.14), residuos (Figura 4.15) y cajas y bigotes (Figura 4.16), no observándose valores atípicos ni tendencias.

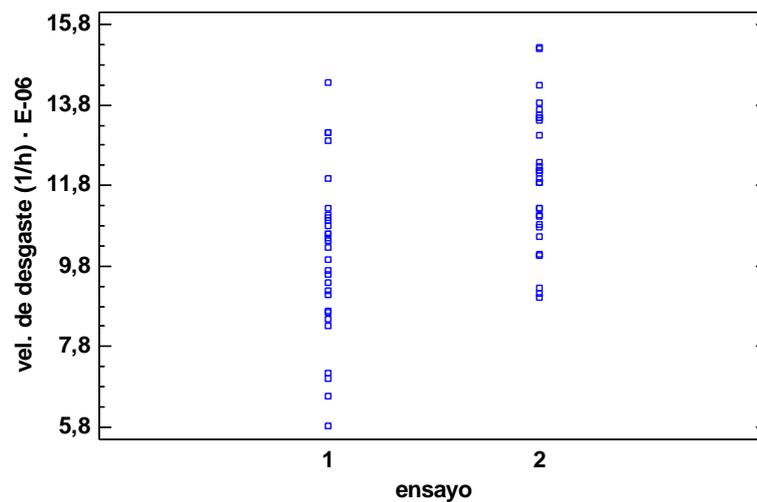


Figura 4.14. Distribución de valores para la velocidad de desgaste relativa por ensayo.

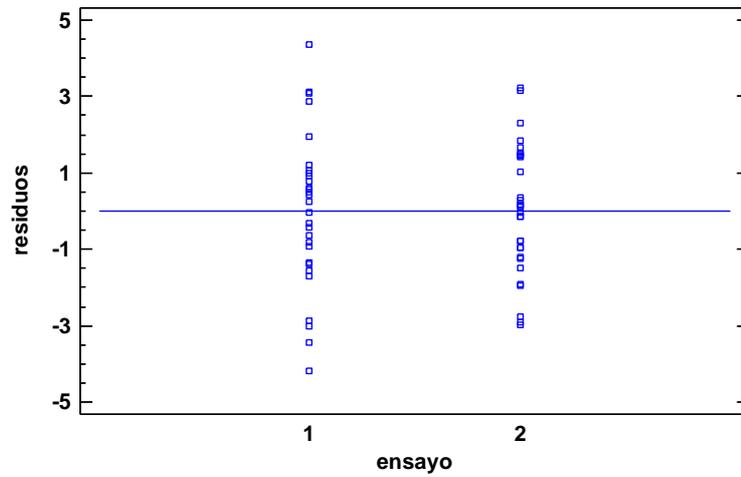


Figura 4.15 Gráfico de residuos

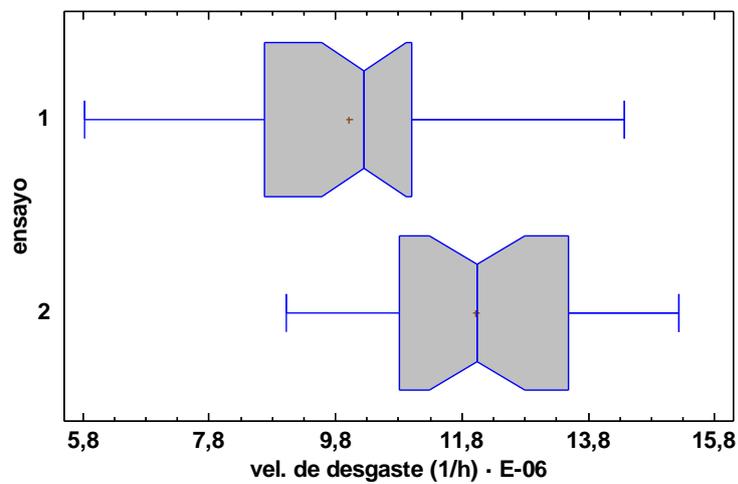


Figura 4.16. Gráfico de cajas y bigotes para la velocidad relativa de desgaste por ensayo

Dados los resultados de este ensayo debemos descartar la hipótesis de que la mayor velocidad de desgaste másico en los segundos ensayos pueda ser debida al menor tamaño inicial de las cuñas. Es más, tal y como era de esperar, la diferencia en velocidad relativa es aún mayor que en absoluta.

4.5.8. ANOVA Velocidad de desgaste / Colada y Ensayo.

Para intentar determinar las posibles causas de la mayor velocidad de desgaste en los segundos ensayos se realizó un análisis de la varianza múltiple clasificando los resultados en función de su colada y del ensayo, analizando también la interacción de estos dos factores para observar su significación de manera conjunta.

La tabla 4.37 muestra los resultados del análisis. Como ya sabíamos, los dos factores principales, la colada y el ensayo, tienen una influencia significativa sobre la velocidad de desgaste, pero como podemos comprobar, la interacción colada / ensayo también tiene una influencia significativa sobre el resultado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:colada	14940,2	2	7470,12	10,69	0,0001
B:ensayo	12009,8	1	12009,8	17,18	0,0001
INTERACCIONES					
AB	10553,7	2	5276,84	7,55	0,0013
RESIDUOS	37042,5	53	698,915		
TOTAL (CORREGIDO)	75103,9	58			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 4.37. Análisis de Varianza para velocidad de desgaste (mg/h) - Suma de Cuadrados Tipo III

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	59	199,092			
colada					
0	19	202,366	6,07348	190,184	214,548
1	20	216,58	5,91149	204,723	228,437
2	20	178,33	5,91149	166,473	190,187
ensayo					
1	29	184,813	4,91528	174,955	194,672
2	30	213,37	4,82671	203,689	223,051
colada por ensayo					
0,1	9	207,171	8,81233	189,496	224,847
0,2	10	197,56	8,36011	180,792	214,329
1,1	10	193,432	8,36011	176,664	210,201
1,2	10	239,727	8,36011	222,958	256,495
2,1	10	153,837	8,36011	137,069	170,605
2,2	10	202,823	8,36011	186,055	219,592

Tabla 4.38. Medias por Mínimos Cuadrados para velocidad de desgaste (mg/h) con intervalos de confianza del 95,0%

En la tabla 4.38 podemos observar algunos datos ya conocidos, como que la colada 2 es significativamente diferente a la 1 y a la 0 y que la velocidad de desgaste es significativamente mayor en los segundos ensayos. Pero cuando observamos las medias de los grupos cruzados podemos observar que la colada 0 no presenta ninguna diferencia significativa en las tasas de desgaste entre los primeros y los segundos ensayos, mientras que las coladas 1 y 2 si presentan grandes diferencias significativas según el ensayo. Este efecto puede observarse gráficamente en la figura 4.17.

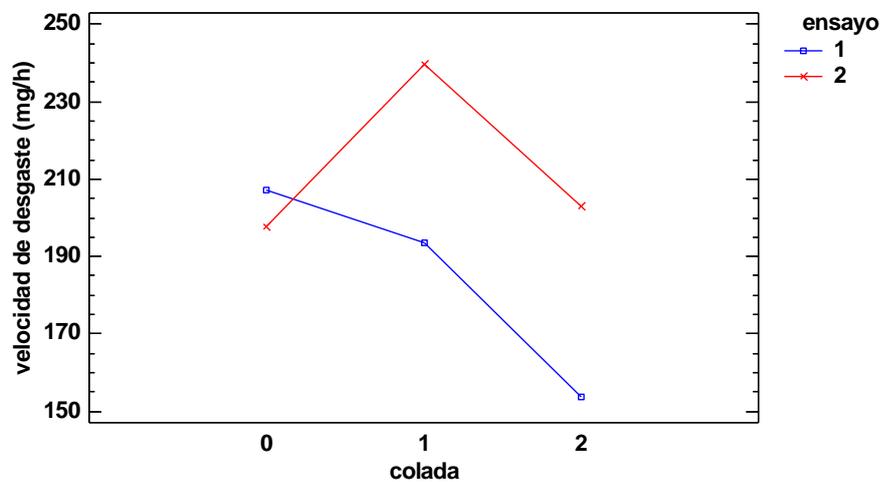


Figura 4.17. Gráfico de interacciones

Dado que la colada 0 es esencialmente distinta por su microestructura, debemos pensar en factores que afecten a la misma para explicar la influencia del ensayo. En los aceros de matriz austenítica tenemos dos efectos contrapuestos en el ensayo del molino: el endurecimiento por deformación, que debería aumentar la resistencia al desgaste conforme avanza el ensayo, y el decaimiento de la austenita por efecto de la temperatura.

Este último es el principal candidato a explicar el fenómeno del aumento de la velocidad de desgaste, ya que este decaimiento por la combinación de tiempo y temperatura disminuye la capacidad de endurecimiento por deformación de los aceros austeníticos al manganeso y, por tanto, incrementará la tasa de desgaste con el tiempo de permanencia a alta temperatura. Puede observarse además que el decaimiento en ambas coladas es muy semejante.

Mientras, los aceros bonificados basan su resistencia al desgaste no en la capacidad de endurecimiento por transformación o deformación sino en su dureza. Esta dureza tiene una disminución despreciable ya que las transformaciones finales de su microestructura en su revenido final se producen a temperaturas muy superiores a las de permanencia en el molino y por tanto es muy estable a esas temperaturas.

Por último se analizaron los residuos (Figura 4.18) para la validación del ensayo, no observándose problema ninguno en su distribución.

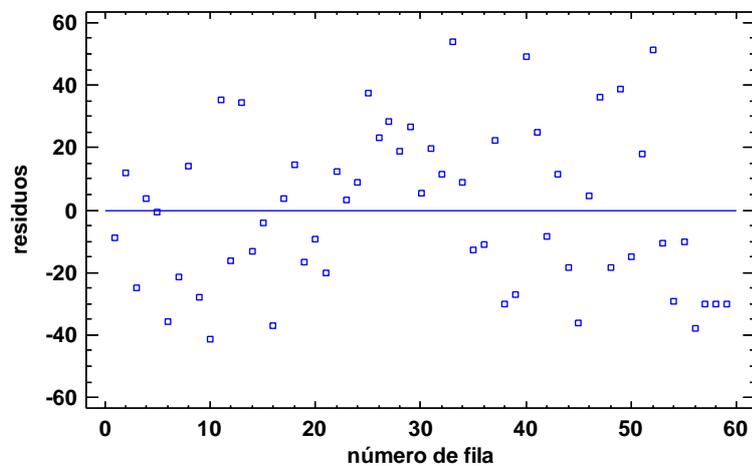


Figura 4.18. Gráfico de residuos.

4.5.9. ANOVA Velocidad de desgaste / Molino.

Se realizó a continuación un análisis simple de la varianza para estimar la igualdad de medias de las velocidades de desgaste agrupadas por molinos. La tabla 4.39 muestra los resultados del contraste para la hipótesis de normalidad, que todos superan.

<i>molino</i>	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>
A	24	199,212	39,6761	19,9165%	112,348	262,071	149,723
B	24	200,363	37,4821	18,7071%	133,644	278,304	144,659
C	11	195,321	25,2789	12,9422%	168,293	244,811	76,5184
Total	59	198,955	35,9847	18,0868%	112,348	278,304	165,955

<i>molino</i>	<i>Sesgo Estandarizado</i>	<i>Curtosis Estandarizada</i>
A	-1,00804	-0,165895
B	1,16973	-0,133034
C	0,961024	-0,356692
Total	0,208691	-0,138154

Tabla 4.39 Resumen Estadístico para Velocidad de desgaste (mg/h) por molino.

El análisis de igualdad de medias dio positivo para los tres molinos al obtenerse un valor-P elevado (Tabla 4.40) al igual que la de varianzas (Tabla 4.41), pudiendo confirmarse que el factor del molino no tiene ninguna influencia de manera independiente sobre los resultados del análisis.

La comprobación de la igualdad de varianzas (Tabla 4.42) y los gráficos de valores (Figura 4.19), residuos (Figura 4.20) y cajas y bigotes (Figura 4.21) no invalidan el resultado del análisis.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	194,409	2	97,2047	0,07	0,9300
Intra grupos	74909,5	56	1337,67		
Total (Corr.)	75103,9	58			

Tabla 4.40. Tabla ANOVA para Velocidad de desgaste (mg/h) por molino

<i>molino</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
A	24	31,5417
B	24	29,4583
C	11	27,8182

Estadístico = 0,394735 Valor-P = 0,820889

Tabla 4.41. Prueba de Kruskal-Wallis para Velocidad de desgaste (mg/h) por molino

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	0,814642	0,447976

<i>Comparación</i>	<i>Sigma1</i>	<i>Sigma2</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Valor</i>
A / B	39,6761	37,4821	1,12049	0,7873
A / C	39,6761	25,2789	2,46344	0,1402
B / C	37,4821	25,2789	2,19854	0,1961

Tabla 4.42. Verificación de Varianza

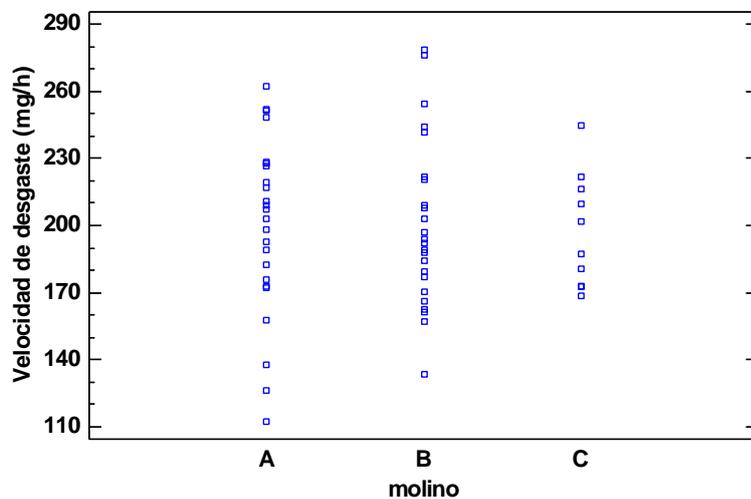


Figura 4.19. Dispersión de valores por molino.

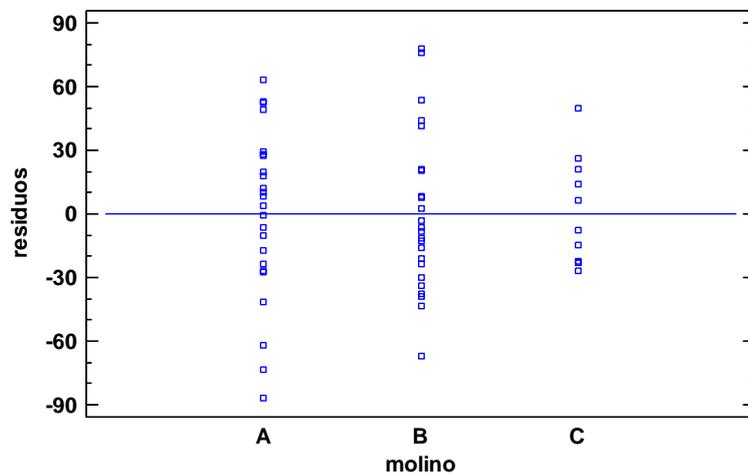


Figura 4.20. Gráfico de residuos.

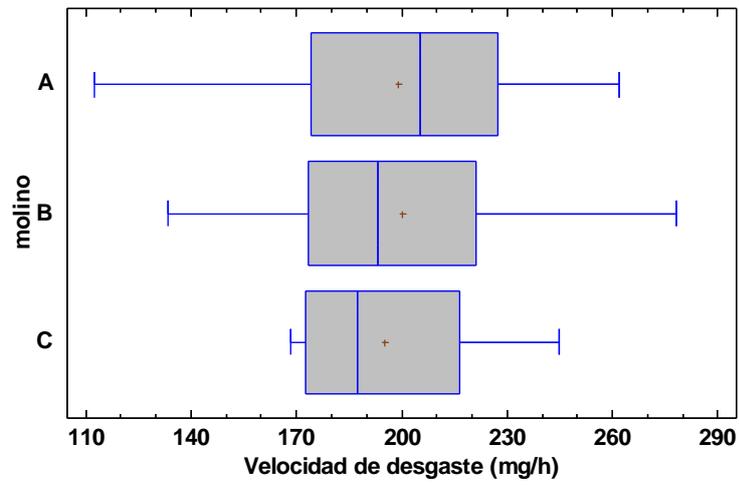


Figura 4.21. Gráfico de cajas y bigotes.

4.5.10. ANOVA Velocidad de desgaste / Molino, Ensayo y Colada.

Para descartar los efectos de las interacciones no analizadas del molino con los demás factores se realizó finalmente un análisis anova múltiple entre los 3 factores de niveles fijos de nuestro experimento. En la tabla 4.43 se resumen todos los factores de influencia así como sus interacciones

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:molino	16,8906	2	8,4453	0,02	0,9850
B:ensayo	4069,37	1	4069,37	7,30	0,0100
C:colada	13875,6	2	6937,78	12,44	0,0001
INTERACCIONES					
AB	10616,2	2	5308,12	9,52	0,0004
AC	2515,89	4	628,972	1,13	0,3566
BC	9462,76	2	4731,38	8,49	0,0008
ABC	867,546	4	216,887	0,39	0,8153
RESIDUOS	22860,3	41	557,568		
TOTAL (CORREGIDO)	75103,9	58			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 4.43. Análisis de Varianza para Velocidad de desgaste (mg/h) - Suma de Cuadrados Tipo III

Los factores de primer orden ya son conocidos y se han estudiado por separado. De los factores de segundo orden se ha estudiado la interacción colada – ensayo, que tanto individualmente como en conjunto son significativos. La aportación de este análisis es la determinación de la combinación molino – ensayo como significativa, así como la determinación de las interacciones molino – colada y la de tercer orden como no significativas.

El detalle de la combinación molino – ensayo se puede estudiar en la tabla de medias por efectos en la tabla 4.44. Podemos comprobar que mientras en los molinos A y B existen diferencias significativas para los ensayos 1 y 2, en el molino C esa diferencia no es significativa. Es más, del gráfico de la interacción de la figura 4.22 se puede observar una inversión completa en el valor de la media del molino C con respecto al efecto principal del ensayo. De no ser porque el número de observaciones en el molino C es la mitad que en los otros, muy posiblemente el resultado hubiese sido significativo en el sentido opuesto al de los molinos A y B.

De la observación de los datos vemos que los tiempos de ensayo en el molino C son mucho más largos que en los A y B, por lo que la causa de la posible inversión puede ser el tiempo de ensayo y la pérdida de masa en el mismo, por lo que se ensayó de nuevo la velocidad relativa.

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	59	199,674			
molino					
A	24	199,212	4,81996	189,478	208,946
B	24	200,363	4,81996	190,629	210,097
C	11	199,445	7,36261	184,576	214,315
ensayo					
1	29	190,638	4,90841	180,725	200,551
2	30	208,709	4,5443	199,532	217,886
colada					
0	19	205,431	6,22254	192,864	217,998
1	20	215,877	5,56561	204,637	227,117
2	20	177,713	5,56561	166,473	188,953
molino por ensayo					
A,1	12	175,523	6,81645	161,757	189,289
A,2	12	222,901	6,81645	209,135	236,667
B,1	12	182,903	6,81645	169,137	196,67
B,2	12	217,823	6,81645	204,057	231,589
C,1	5	213,488	11,1312	191,008	235,968
C,2	6	185,403	9,63992	165,935	204,871
molino por colada					
A,0	8	211,452	8,34841	194,592	228,312
A,1	8	212,012	8,34841	195,152	228,872
A,2	8	174,172	8,34841	157,312	191,032
B,0	8	193,494	8,34841	176,634	210,354
B,1	8	223,255	8,34841	206,395	240,115
B,2	8	184,34	8,34841	167,48	201,2
C,0	3	211,347	14,4599	182,145	240,55
C,1	4	212,363	11,8064	188,519	236,207
C,2	4	174,626	11,8064	150,783	198,47
ensayo por colada					
1,0	9	216,581	9,63992	197,113	236,049
1,1	10	197,706	7,87096	181,81	213,601
1,2	10	157,628	7,87096	141,732	173,523
2,0	10	194,281	7,87096	178,385	210,177
2,1	10	234,048	7,87096	218,152	249,944
2,2	10	197,798	7,87096	181,902	213,694

Tabla 4.44. Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Velocidad de desgaste (mg/h) con intervalos de confianza del 95,0%

En la figura 4.23 observamos la ausencia de tendencias en los residuos del análisis.

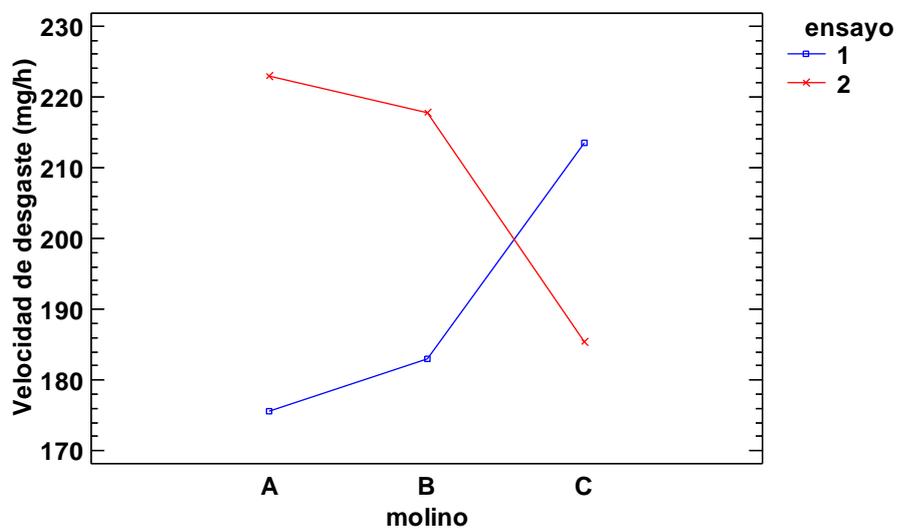


Figura 4.22. Interacción molino – ensayo sobre la velocidad de desgaste.

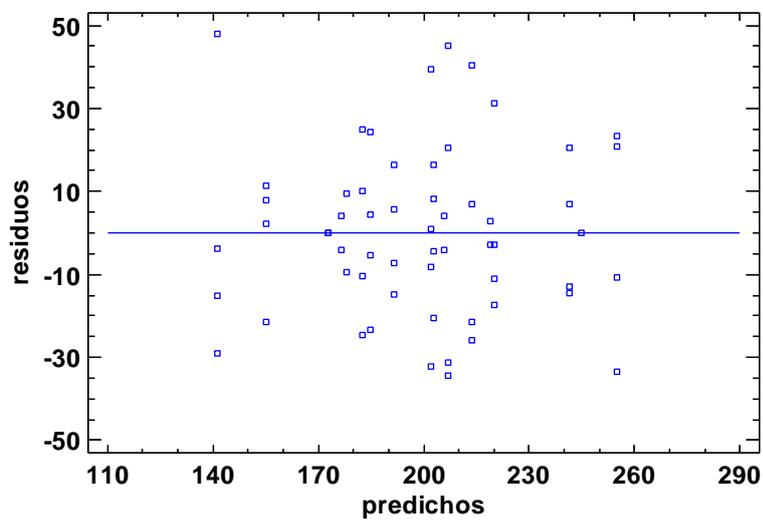


Figura 4.23. Gráfico de residuos.

4.5.11. ANOVA Velocidad relativa / Molino, Ensayo y Colada.

Para intentar comprobar la hipótesis de que la inversión del comportamiento en el molino C se puede deber a la pérdida de peso de la cuña por estancias largas en el molino se realiza de nuevo el ensayo anterior eligiendo como variable de salida la pérdida de masa relativa a la masa inicial.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:molino	20,5534	2	10,2767	6,04	0,0050
B:ensayo	25,2938	1	25,2938	14,87	0,0004
C:colada	48,0423	2	24,0211	14,12	0,0000
INTERACCIONES					
AB	22,3994	2	11,1997	6,59	0,0033
AC	5,76952	4	1,44238	0,85	0,5030
BC	27,1802	2	13,5901	7,99	0,0012
ABC	2,61236	4	0,65309	0,38	0,8188
RESIDUOS	69,7296	41	1,70072		
TOTAL (CORREGIDO)	255,448	58			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 4.45. Análisis de Varianza para Vel. (1/h) · E-06 - Suma de Cuadrados Tipo III

Como podemos observar en la tabla 4.45 todos los factores e interacciones significativos continúan siendo los mismos, como era de esperar. En la tabla 4.46 observamos ya como el cambio de tendencia entre el ensayo 1 y el ensayo 2 para el molino C no sólo no es significativo sino que la diferencia entre ambos ensayos es prácticamente nula. La diferencia con el contraste anterior puede hacerse comparando el nuevo gráfico de la interacción en la figura 4.23 con el anterior en la figura 4.22.

Aún así el dato de los ensayos 1 en el molino C continúa siendo radicalmente distinto al dato correspondiente de los molinos A y B. Ya que el tiempo de residencia en los primeros ensayos del molino C prácticamente triplica al del molino A y duplica al del B podemos esperar que la pérdida de capacidad de endurecimiento por permanencia a alta temperatura de las coladas de matriz austenítica sea la causa de la interacción.

Para comprobar este supuesto se realizó un nuevo análisis excluyendo los datos de la colada 0.

Se validó el análisis con una nueva comprobación de los residuos de la figura 4.24.

			<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Est.</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
MEDIA GLOBAL	59	11,2927			
molino					
A	24	10,6787	0,266202	10,1411	11,2163
B	24	10,8808	0,266202	10,3432	11,4184
C	11	12,3187	0,40663	11,4975	13,14
ensayo					
1	29	10,5804	0,271087	10,0329	11,1279
2	30	12,0051	0,250977	11,4982	12,5119
colada					
0	19	11,6831	0,343665	10,9891	12,3772
1	20	12,2095	0,307383	11,5888	12,8303
2	20	9,98555	0,307383	9,36478	10,6063
molino por ensayo					
A,1	12	9,31696	0,376466	8,55667	10,0772
A,2	12	12,0404	0,376466	11,2801	12,8007
B,1	12	9,7492	0,376466	8,98891	10,5095
B,2	12	12,0124	0,376466	11,2521	12,7727
C,1	5	12,675	0,614767	11,4335	13,9166
C,2	6	11,9625	0,532403	10,8873	13,0377
molino por colada					
A,0	8	11,4416	0,461075	10,5104	12,3727
A,1	8	11,417	0,461075	10,4859	12,3482
A,2	8	9,17738	0,461075	8,24621	10,1085
B,0	8	10,6944	0,461075	9,76321	11,6255
B,1	8	12,0689	0,461075	11,1378	13,0001
B,2	8	9,87911	0,461075	8,94795	10,8103
C,0	3	12,9134	0,798605	11,3006	14,5262
C,1	4	13,1427	0,652058	11,8258	14,4595
C,2	4	10,9002	0,652058	9,58331	12,217
ensayo por colada					
1,0	9	12,0545	0,532403	10,9793	13,1297
1,1	10	10,9548	0,434706	10,0769	11,8327
1,2	10	8,73185	0,434706	7,85394	9,60976
2,0	10	11,3117	0,434706	10,4338	12,1896
2,1	10	13,4643	0,434706	12,5864	14,3422
2,2	10	11,2393	0,434706	10,3613	12,1172

Tabla 4.46. Medias por Mínimos Cuadrados para Vel. (1/h) · E-06 con intervalos de confianza del 95,0%

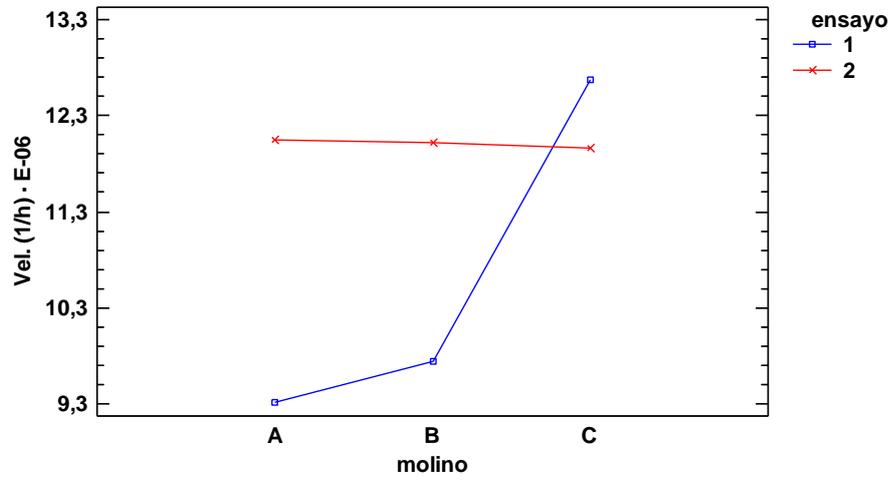


Figura 4.23. Gráfico de interacciones.

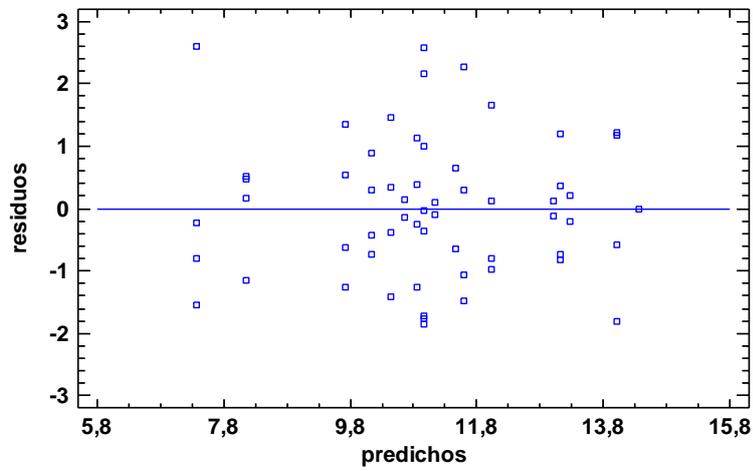


Figura 4.24. Gráfico de residuos.

4.5.12. ANOVA Velocidad relativa / Molino, Ensayo y Colada para las coladas 1 y 2.

Se trata en este ensayo de estimar la posible influencia del tiempo de permanencia en el horno sobre la resistencia al desgaste de las coladas de acero austenítico al manganeso. En la tabla 4.47 ya podemos apreciar los primeros cambios en la significación del efecto principal molino.

Esta significación puede ser debida a que cada molino cuenta con tiempos de residencia distintos, y al eliminar una colada como la 0, prácticamente independiente frente al tiempo de residencia, el efecto amortiguador que realizaba sobre los datos impedía observar la significación de las diferencias de tiempo de cada molino. Eso sí, al ser pequeñas las diferencias sólo existe una distancia significativa entre el molino A y C, estando al borde de la significación la distancia B y C y siendo muy semejantes las medidas de A y B. Estas medidas se pueden consultar en las tablas 4.48 y 4.49.

Se observa también la desaparición de la interacción ensayo – colada al integrarse toda la fuente de variabilidad sobre los efectos principales. En los casos anteriores era la colada 0, con su comportamiento constante frente a la variable ensayo por su independencia frente al tiempo, la que daba significación a la interacción.

Coherentemente con la hipótesis realizada se mantiene firme la interacción molino-ensayo debido a la diferencia de tiempo de residencia fundamental entre el molino C y los otros dos como se puede observar en la tabla 4.48 y gráficamente en la figura 4.25.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:molino	15,9556	2	7,9778	4,53	0,0198
B:ensayo	56,6293	1	56,6293	32,15	0,0000
C:colada	44,5155	1	44,5155	25,27	0,0000
INTERACCIONES					
AB	16,4219	2	8,21096	4,66	0,0179
AC	0,00619616	2	0,00309808	0,00	0,9982
BC	0,00000922364	1	0,00000922364	0,00	0,9982
ABC	0,25492	2	0,12746	0,07	0,9304
RESIDUOS	49,317	28	1,76132		
TOTAL (CORREGIDO)	217,392	39			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 4.47. Análisis de Varianza para Vel. (1/h) · E-06 - Suma de Cuadrados Tipo III

			Error	Límite	Límite
Nivel	Casos	Media	Est.	Inferior	Superior
MEDIA GLOBAL	40	11,0976			
molino					
A	16	10,2972	0,331787	9,61757	10,9768
B	16	10,974	0,331787	10,2944	11,6537
C	8	12,0214	0,469218	11,0603	12,9826
ensayo					
1	20	9,84334	0,312812	9,20258	10,4841
2	20	12,3518	0,312812	11,711	12,9925
colada					
1	20	12,2095	0,312812	11,5688	12,8503
2	20	9,98555	0,312812	9,34478	10,6263
molino por ensayo					
A,1	8	8,5516	0,469218	7,59045	9,51275
A,2	8	12,0428	0,469218	11,0817	13,004
B,1	8	9,14512	0,469218	8,18397	10,1063
B,2	8	12,8029	0,469218	11,8418	13,7641
C,1	4	11,8333	0,663574	10,474	13,1926
C,2	4	12,2095	0,663574	10,8503	13,5688
molino por colada					
A,1	8	11,417	0,469218	10,4559	12,3782
A,2	8	9,17738	0,469218	8,21622	10,1385
B,1	8	12,0689	0,469218	11,1078	13,0301
B,2	8	9,87911	0,469218	8,91796	10,8403
C,1	4	13,1427	0,663574	11,7834	14,5019
C,2	4	10,9002	0,663574	9,5409	12,2594
ensayo por colada					
1,1	10	10,9548	0,442383	10,0487	11,861
1,2	10	8,73185	0,442383	7,82567	9,63803
2,1	10	13,4643	0,442383	12,5581	14,3704
2,2	10	11,2393	0,442383	10,3331	12,1454

Tabla 4.48. Medias por Mínimos Cuadrados para Vel. (1/h) · E-06 con intervalos de confianza del 95,0%

molino	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A	16	10,2972	0,331787	X
B	16	10,974	0,331787	XX
C	8	12,0214	0,469218	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
A - B		-0,676824	0,961151
A - C	*	-1,72421	1,17716
B - C		-1,04739	1,17716

* indica una diferencia significativa. Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 4.49. Pruebas de Múltiple Rangos para Vel. (1/h) · E-06 por molino

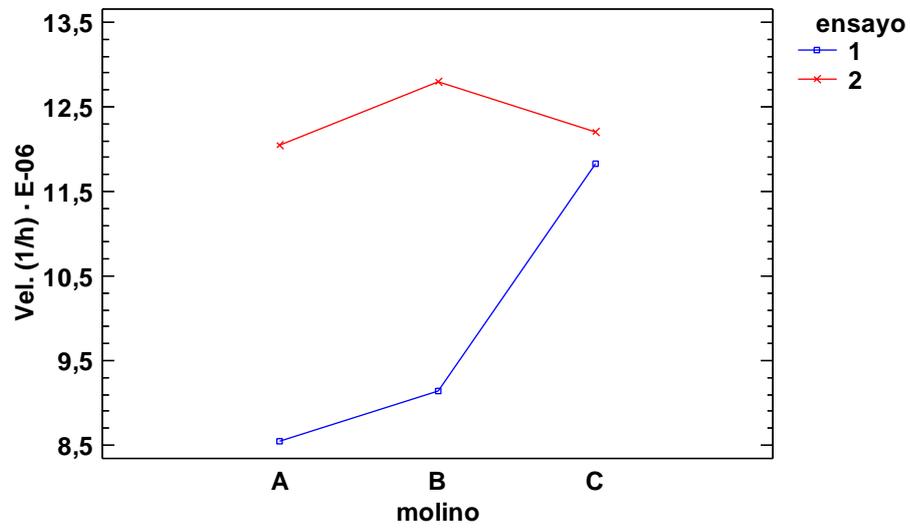


Figura 4.24 Gráfico de interacciones.

Por último se comprueba la ausencia de problemas en el gráfico de residuos.

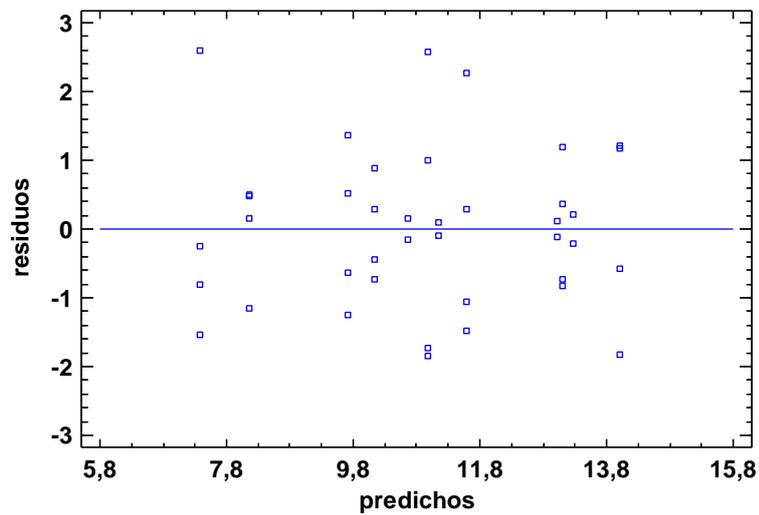


Figura 4.25. Gráfico de residuos.

Una vez comprobado que tanto la significación de los efectos principales molino y ensayo como los de su interacción pueden ser debidos a la variable tiempo de residencia, subyacente a ambas variables, debemos generar una variable nueva que pueda conjugar el efecto de ambas para explicar la variabilidad de los valores obtenidos en los ensayos.

4.5.13. ANOVA Velocidad relativa / Tiempo medio y Colada para las coladas 1 y 2.

Para intentar unir los efectos de las variables ensayo y molino se generó una variable nueva, el tiempo medio de residencia, o simplemente tiempo medio, que consiste en el tiempo que ha permanecido la cuña dentro del horno desde su fabricación hasta el momento central del tiempo en el que se mide el desgaste para cada ensayo.

Esto es, para los ensayos clasificados como 1 el tiempo medio será la mitad de la permanencia en el horno del ensayo (998 horas para el molino A, 1822 para el B y 3059,5 para el C) mientras que para los ensayos 2 será el tiempo completo del primer ensayo correspondiente más la mitad de la permanencia para este segundo ensayo (6190,5 horas para el molino A, 7817,5 para el B y 12114 para el C).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: tiempo medio	118,511	5	23,7022	13,46	0,0000
B: colada	44,5155	1	44,5155	25,27	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,267133	5	0,0534266	0,03	0,9995
RESIDUOS	49,317	28	1,76132		
TOTAL (CORREGIDO)	217,392	39			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 4.50. Análisis de Varianza para Vel. (1/h) · E-06 - Suma de Cuadrados Tipo III

Como podemos ver en la tabla 4.50, los dos efectos principales explican prácticamente toda la variabilidad de los resultados experimentales con unos resultados asombrosos, con valores P menores a 10^{-4} , mientras que la interacción entre ambos no tiene absolutamente ninguna significación con un valor-P de 0,9995.

Además de explicar completamente la variabilidad de las medidas, este ensayo nos permite observar la homogeneidad del comportamiento de ambas aleaciones. Como podemos comprobar en la tabla 4.51, las diferencias de las medias de los valores de las coladas 1 y 2 son prácticamente constantes, de media 2,24 y una desviación típica de tan solo 0,17. Esta escasísima variabilidad y la asombrosa semejanza de comportamiento la podemos observar gráficamente en la figura 4.26.

			Error	Límite	Límite
Nivel	Casos	Media	Est.	Inferior	Superior
MEDIA GLOBAL	40	11,0976			
tiempo medio					
988	8	8,5516	0,469218	7,59045	9,51275
1822	8	9,14512	0,469218	8,18397	10,1063
3059,5	4	11,8333	0,663574	10,474	13,1926
6190,5	8	12,0428	0,469218	11,0817	13,004
7817,5	8	12,8029	0,469218	11,8418	13,7641
12114,5	4	12,2095	0,663574	10,8503	13,5688
colada					
1	20	12,2095	0,312812	11,5688	12,8503
2	20	9,98555	0,312812	9,34478	10,6263
tiempo medio por colada					
988,1	4	9,72159	0,663574	8,36232	11,0809
988,2	4	7,38161	0,663574	6,02233	8,74088
1822,1	4	10,1301	0,663574	8,7708	11,4893
1822,2	4	8,16018	0,663574	6,8009	9,51945
3059,5,1	2	13,0128	0,938436	11,0905	14,9351
3059,5,2	2	10,6538	0,938436	8,73147	12,5761
6190,5,1	4	13,1125	0,663574	11,7532	14,4717
6190,5,2	4	10,9731	0,663574	9,61387	12,3324
7817,5,1	4	14,0078	0,663574	12,6485	15,3671
7817,5,2	4	11,598	0,663574	10,2388	12,9573
12114,5,1	2	13,2725	0,938436	11,3502	15,1948
12114,5,2	2	11,1466	0,938436	9,22427	13,0689

Tabla 4.51. Medias por Mínimos Cuadrados para Vel. (1/h) · E-06 con intervalos de confianza del 95,0%

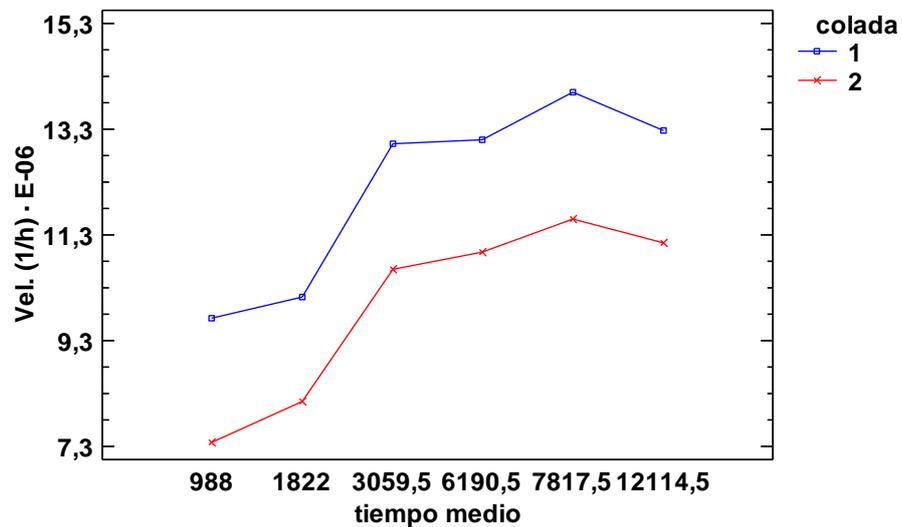


Figura 4.26. Gráfico de interacciones.

tiempo medio	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
988	8	8,5516	0,469218	X
1822	8	9,14512	0,469218	X
3059,5	4	11,8333	0,663574	X
6190,5	8	12,0428	0,469218	X
12114,5	4	12,2095	0,663574	X
7817,5	8	12,8029	0,469218	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
988 - 1822		-0,593525	1,35927
988 - 3059,5	*	-3,28171	1,66476
988 - 6190,5	*	-3,49121	1,35927
988 - 7817,5	*	-4,25133	1,35927
988 - 12114,5	*	-3,65793	1,66476
1822 - 3059,5	*	-2,68818	1,66476
1822 - 6190,5	*	-2,89768	1,35927
1822 - 7817,5	*	-3,65781	1,35927
1822 - 12114,5	*	-3,06441	1,66476
3059,5 - 6190,5		-0,209503	1,66476
3059,5 - 7817,5		-0,969626	1,66476
3059,5 - 12114,5		-0,376226	1,9223
6190,5 - 7817,5		-0,760122	1,35927
6190,5 - 12114,5		-0,166723	1,66476
7817,5 - 12114,5		0,5934	1,66476

* indica una diferencia significativa. Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 4 52. Pruebas de Múltiple Rangos para Vel. (1/h) · E-06 por tiempo medio.

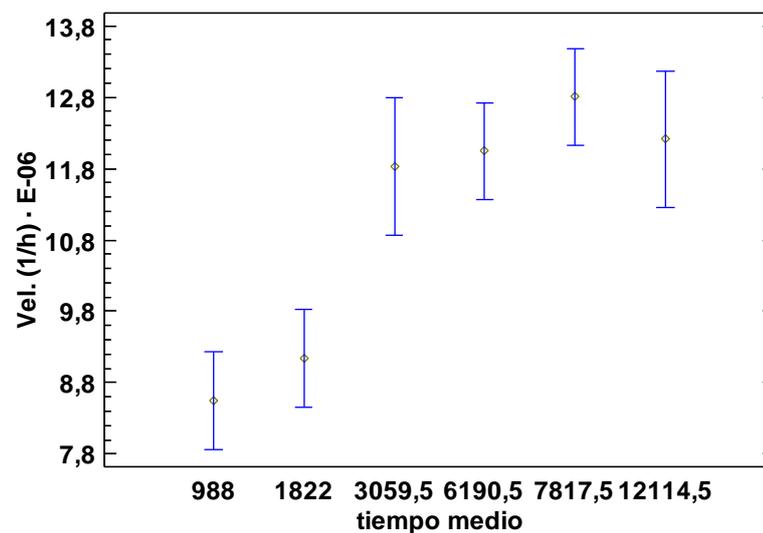


Figura 4.27. Gráfico de medias e intervalos de confianza al 95%

De la información de la tabla de contraste y el gráfico de medias podemos observar dos grupos de tiempos homogéneos; uno para los dos valores de tiempo más bajos,

caracterizado por una baja velocidad de desgaste, y otro grupo con los cuatro tiempos superiores, con velocidades de desgaste más altas. Este tipo de comportamientos es perfectamente compatible con nuestra hipótesis, confirmando que según avanza el tiempo de estancia del material a alta temperatura dentro del horno va disminuyendo su capacidad de endurecimiento y por tanto aumenta su velocidad de desgaste.

Tras comprobar el gráfico de residuos en busca de tendencias o anomalías se dio por válido el análisis

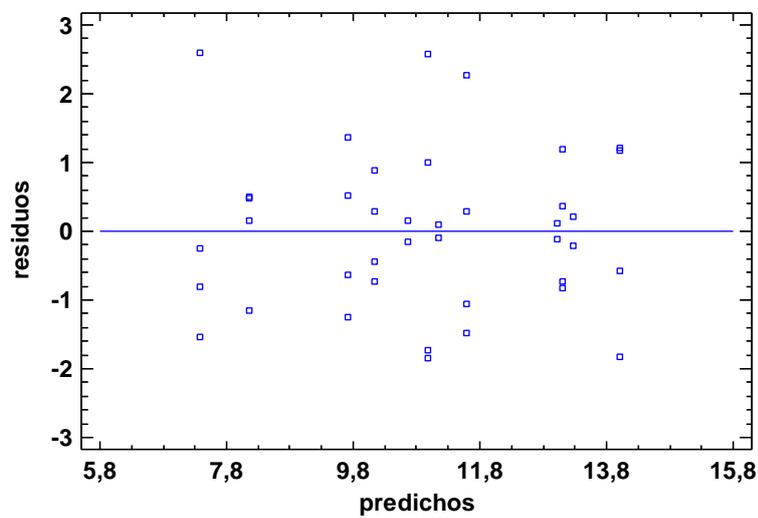


Figura 4.28. Gráfico de residuos.

4.5.14. Análisis de regresión de la colada 1

Cuando se creó la nueva variable hicimos algo más que simplemente conjugar los tres niveles de la variable horno con los dos de ensayo. Además de generar esos seis niveles les asignó un valor numérico que cuantifica un parámetro del ensayo. Gracias a esta característica podemos ahora relacionar el nuevo parámetro cuantificado con la variable de salida de los ensayos anova mediante un análisis de regresión.

Como avanzamos en el apartado 3.4, hemos supuesto inicialmente que la degeneración activada térmicamente en el material por transformaciones de la austenita tiene una cinética equivalente a la que sucede en los revenidos y puede adoptar una fórmula semejante a la descrita por Hollomon y Jaffe.

Empleando nuestra variable velocidad porcentual de desgaste como “tasa de daño” o una medida de la transformación ocurrida en el material, podemos emplearla como un equivalente del parámetro de revenido y por tanto

$$vel = T(C + \log(t))$$

como todos nuestros experimentos han sido realizados a temperatura constante

$$vel = C_1 + C_2 \log(t)$$

por lo que intentaremos establecer una regresión simple entre la velocidad de desgaste y el logaritmo del tiempo de residencia en el horno para verificar nuestra hipótesis.

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-3,26126	2,39789	-1,36005	0,1906
Pendiente	1,87249	0,292119	6,41004	0,0000

Tabla 4.53. Coeficientes de regresión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	52,9697	1	52,9697	41,09	0,0000
Residuo	23,2048	18	1,28916		
Total (Corr.)	76,1745	19			

Tabla 4.54. Análisis de Varianza

Coefficiente de Correlación	0,83389
R-cuadrado	69,5373 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	67,8449 %
Error estándar del est.	1,13541
Error absoluto medio	0,969589
Estadístico Durbin-Watson	2,45697 (P=0,7912)
Autocorrelación de residuos en retraso	-0,251865

Tabla 4.55 Estadísticos de la regresión.

De la tabla 4.54 concluimos que como el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la velocidad y el logaritmo del tiempo medio con un nivel de confianza del 95,0%, lo que confirma la hipótesis anterior.

En la tabla 4.55 vemos que el estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 69,5373% de la variabilidad en la velocidad relativa después de transformar para linearizar el modelo. El coeficiente de correlación es igual a 0,83389, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. Desgraciadamente, el escaso número de muestras hace que esta correlación no sea más elevada y que el error estándar del estimado sea de 1,13541 y el error absoluto medio de 0,969589. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	52,9697	1	52,9697	41,09	0,0000
Residuo	23,2048	18	1,28916		
Carencia de Ajuste	8,13678	4	2,0342	1,89	0,1682
Error Puro	15,0681	14	1,07629		
Total (Corr.)	76,1745	19			

Tabla 4.56. Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste

La prueba de Falta de Ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados, o si se debería utilizar un modelo más complicado. La prueba se realiza comparando la variabilidad de los residuos del modelo actual con la variabilidad entre observaciones hechas en valores repetidos de la variable independiente X. Puesto que el valor-P para la carencia de ajuste en la tabla ANOVA es menor que 0,05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95,0%.

Para comprobar que el ajuste es bueno necesitamos entonces acudir a la comparación de la regresión de la relación logarítmica propuesta con otras relaciones entre las variables. Se realizó el ensayo de regresión para las más comunes, obteniéndose los resultados de la tabla 4.57.

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Multiplicativa	0,8388	70,35%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8373	70,10%
Inversa-Y Log-X	-0,8362	69,92%
Logaritmo de X	0,8339	69,54%
Doble Inverso	0,8336	69,49%
Curva S	-0,8301	68,91%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8258	68,19%
Cuadrado-Y Log-X	0,8217	67,52%
Inversa de X	-0,8197	67,20%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,8027	64,44%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8027	64,43%
Raíz Cuadrada Doble	0,8023	64,36%
Raíz Cuadrada de X	0,8000	64,00%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,7980	63,68%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,7900	62,42%
Raíz Cuadrada de Y	0,7433	55,25%
Exponencial	0,7431	55,22%
Lineal	0,7417	55,01%
Inversa de Y	-0,7375	54,39%
Cuadrado de Y	0,7332	53,76%
Log-Y Cuadrado-X	0,5939	35,28%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,5939	35,27%
Cuadrado de X	0,5923	35,08%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5894	34,74%
Cuadrado Doble	0,5845	34,17%

Tabla 4.57 Comparación de modelos.

En esta tabla podemos observar que nuestro modelo está entre los de mejor correlación, no existiendo prácticamente diferencias con los que están por encima de él, mucho más complejos. Además, son todos modelos que incluyen una relación de una función de la velocidad con el logaritmo del tiempo y, por tanto, compatibles con nuestra hipótesis. La calidad del análisis queda finalmente confirmada al no existir puntos atípicos ni valores con una influencia superior al triple de la influencia media de los valores.

La representación gráfica del análisis se da en la figura 4.29, y el de residuos en la figura 4.30.

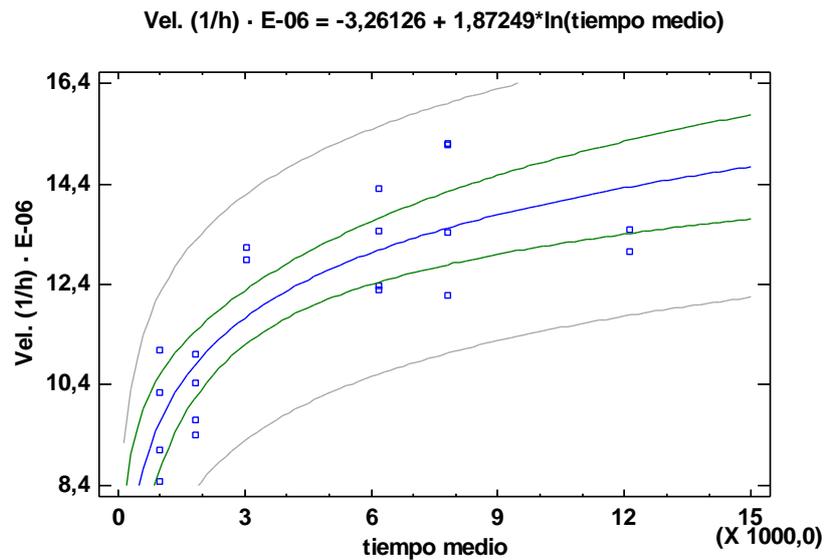


Figura 4.29 Gráfico de regresión

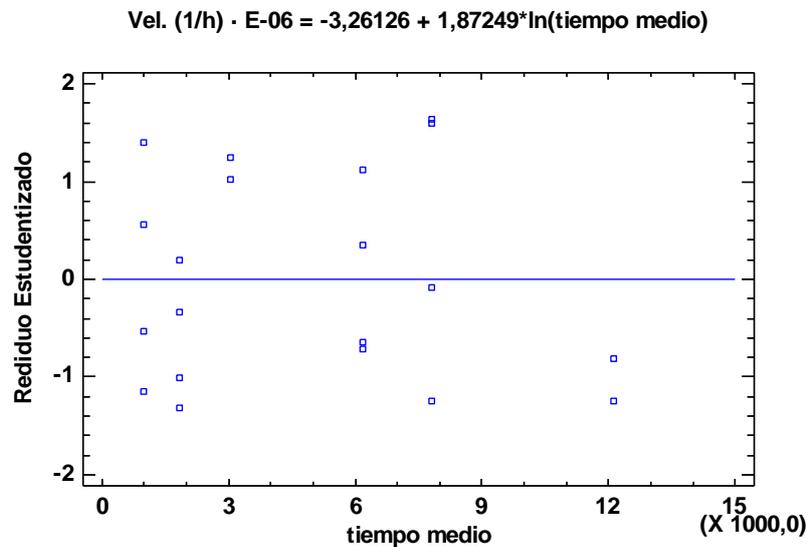


Figura 4.30. Gráfico de residuos.

Para comprobar que la calidad del ajuste, representada por el valor del coeficiente de correlación, no es mayor por culpa de la escasez de muestras realizaremos un ajuste sin la constante de intercepción. Así, al tener que realizar una estimación menos, podremos obtener un mejor ajuste común mejor coeficiente de correlación y demostrar la dependencia en forma logarítmica que requiere nuestra hipótesis.

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Pendiente	1,47743	0,0316132	46,7346	0,0000

Tabla 4.58. Coeficientes de regresión.

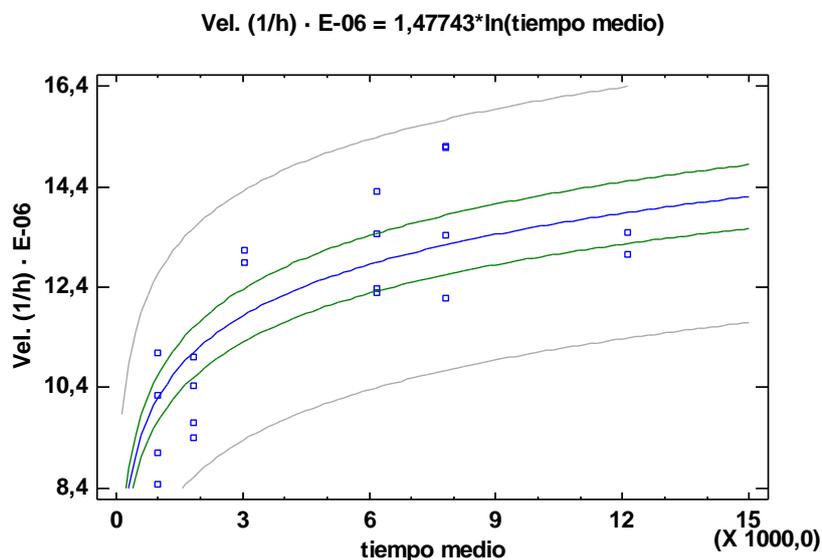
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2941,6	1	2941,6	2184,12	0,0000
Residuo	25,5894	19	1,34681		
Total	2967,19	20			

Tabla 4.59. Análisis de Varianza

Coefficiente de Correlación	0,995679
R-cuadrada	99,1376 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	99,1376 %
Error estándar del est.	1,16052
Error absoluto medio	0,972159
Estadístico Durbin-Watson	2,16793
Autocorrelación de residuos en retraso 1	-0,087167

Tabla 4.60. Estadísticos de la regresión

La enorme mejora debida a la necesidad de estimar un parámetro menos hace que el coeficiente de correlación se dispare hasta más de 0,995 con un coeficiente R cuadrado de más del 99%, indicando un ajuste excepcional de los datos a una dependencia logarítmica. La gráfica de la regresión nos muestra el nuevo ajuste en la figura



4.5.15. Análisis de regresión de la colada 2

Al igual que hicimos con la colada uno, se realizó un análisis de regresión sobre los datos disponibles para la colada 2 según un modelo logarítmico.

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-5,37294	3,13647	-1,71305	0,1039
Pendiente	1,85919	0,382095	4,86577	0,0001

Tabla 4.61. Coeficientes de regresión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	52,2196	1	52,2196	23,68	0,0001
Residuo	39,7011	18	2,20562		
Total (Corr.)	91,9207	19			

Tabla 4.62. Análisis de Varianza

Coeficiente de Correlación	0,75372
R-cuadrada	56,8094 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	54,4099 por ciento
Error estándar del est.	1,48513
Error absoluto medio	1,18329
Estadístico Durbin-Watson	2,12616 (P = 0,5154)
Autocorrelación de residuos en retraso 1	-0,0867439

Tabla 4.63. Estadísticos de la regresión

Los datos de las tablas 4.62 y 4.63 muestran un ajuste algo más débil que el de la colada 1, pero igualmente significativo. Comparando la tabla de coeficientes de regresión 4.61 de la colada 2 con la tabla 4.53 para la colada 1 observamos que el valor de la pendiente para ambos ajustes es muy similar; 1,86 para la colada 2 frente a 1,87 para la colada 1, siendo la diferencia fundamental entre ambos ajuste el valor de la constante aditiva.

Nuevamente comprobamos en la tabla 4.65 que el ajuste es adecuado para explicar la variabilidad de los datos, mostrándose en la figura 4.31 y 4.32 la gráfica del ajuste y de los residuos respectivamente.

A diferencia del ajuste anterior, en este si nos encontramos con un residuo atípico, analizado en la tabla 4.64. Este residuo se encuentra al límite de la significación para un nivel del 95%, siendo no significativo para un nivel de 96%, lo que unido a la alta calidad del ajuste hace que no sea necesaria su eliminación.

		Predicciones		Residuos
X	Y	Y	Residuos	Studentizados
6190,5	13,5475	10,8592	2,68831	2,04

Tabla 4.64. Residuos Atípicos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	52,2196	1	52,2196	23,68	0,0001
Residuo	39,7011	18	2,20562		
Carencia de Ajuste	5,45211	4	1,36303	0,56	0,6974
Error Puro	34,249	14	2,44636		
Total (Corr.)	91,9207	19			

Tabla 4.65 Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste

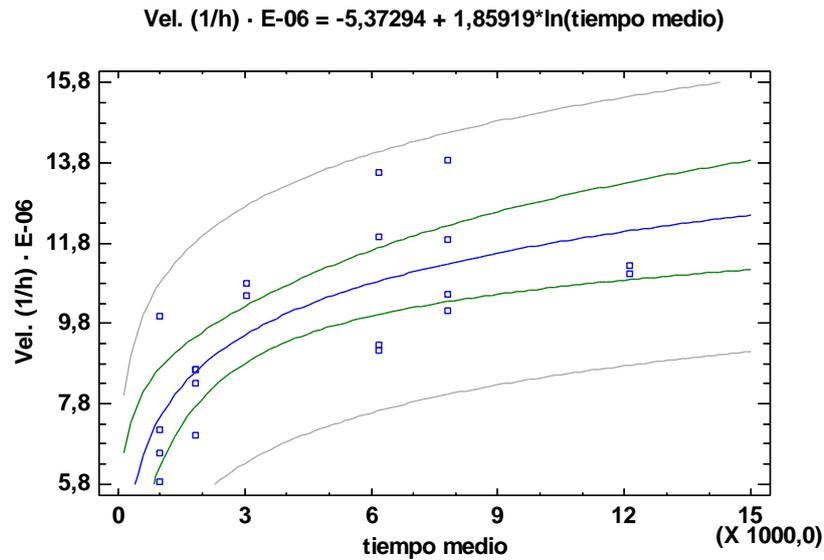


Figura 4.31. Gráfica de regresión.

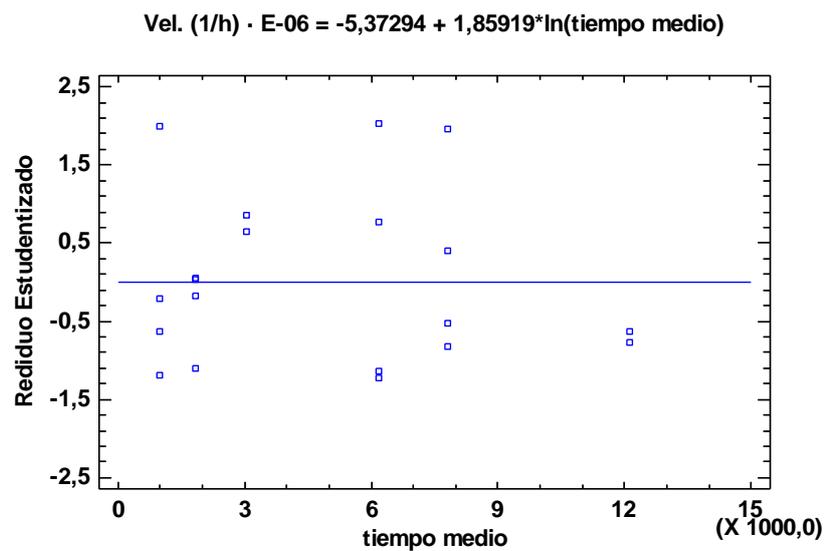


Figura 4.32 Gráfica de residuos.

De igual manera que hicimos en el apartado anterior y con el fin de observar la influencia de la escasez de datos a la hora de estimar dos parámetros se procedió a la realización de un ajuste con paso por cero para mejorar los estadísticos.

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Pendiente	1,20832	0,0424654	28,4542	0,0000

Tabla 4.66 Coeficientes de regresión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1967,58	1	1967,58	809,64	0,0000
Residuo	46,1736	19	2,43019		
Total	2013,75	20			

Tabla 4.67. Análisis de Varianza

Coefficiente de Correlación	0,988469
R-cuadrada	97,7071 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	97,7071 %
Error estándar del est.	1,55891
Error absoluto medio	1,26571
Estadístico Durbin-Watson	1,75637
Autocorrelación de residuos en retraso	0,0872806

Tabla 4.68 Estadísticos de regresión

		Predicciones		Residuos
X	Y	Y	Residuos	Studentizados
6190,5	13,5475	10,5495	2,99797	2,16
7817,5	13,8627	10,8315	3,03119	2,20

Tabla 4.69 Residuos Atípicos

Como sucedía en el caso anterior, los valores del coeficiente de correlación y R cuadrado suben hasta valores muy altos, con la desventaja de que no aparece un nuevo valor atípico con este modelo, aunque siguen por debajo del índice 97,5%.

4.5.16. Análisis de regresión de la colada 0.

Por último se realizó un análisis de regresión de la colada de referencia para comprobar su independencia frente al tiempo.

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,1547	2,39%
Inversa de X	-0,1521	2,31%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,1502	2,26%
Curva S	-0,1479	2,19%
Doble Inverso	0,1423	2,02%
Inversa-Y Log-X	-0,0945	0,89%
Multiplicativa	0,0923	0,85%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,0907	0,82%
Logaritmo de X	0,0888	0,79%
Cuadrado-Y Log-X	0,0841	0,71%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,0585	0,34%
Raíz Cuadrada Doble	0,0549	0,30%
Raíz Cuadrada de X	0,0510	0,26%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,0425	0,18%
Inversa de Y	-0,0394	0,16%
Exponencial	0,0297	0,09%
Cuadrado Doble	-0,0291	0,08%
Raíz Cuadrada de Y	0,0244	0,06%
Lineal	0,0188	0,04%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,0151	0,02%
Cuadrado de X	-0,0137	0,02%
Cuadrado de Y	0,0071	0,01%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0,0062	0,00%
Log-Y Cuadrado-X	0,0012	0,00%

Tabla 4.70. Comparación de Modelos

Como puede deducirse de los datos de la tabla 4.70, todos los ajustes presentan grados de correlación extremadamente bajos, y un análisis anova adicional en la tabla 4.71 muestra la independencia entre ambos factores

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	15,875	5	3,17501	2,02	0,1422
Intra grupos	20,4125	13	1,57019		
Total (Corr.)	36,2876	18			

Tabla 4.71 ANOVA para Vel. (1/h) · E-06 por tiempo medio para la colada 0

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

Se han realizado 10 coladas experimentales de aceros austeníticos al manganeso con carbonos, cobres y manganesos variables, y finalmente aleados con cromo o molibdeno.

Se han ensayado a temperaturas variables entre 100 y 900 °C y se han estudiado las durezas y las microestructuras para determinar las dos composiciones más adecuadas para los ensayos en servicio.

Se han ensayado estas dos composiciones junto con una tercera de referencia durante 25 meses en condiciones reales de trabajo

Se han analizado los datos y se ha determinado por contraste de hipótesis que una de ellas es significativamente superior a la referencia durante el conjunto del ensayo, mientras que la otra no es significativamente distinta de la referencia.

Se ha determinado que mientras que la colada de referencia mantiene una tasa de desgaste constante durante todo el tiempo de ensayo, los aceros austeníticos al manganeso sufren un incremento en la tasa de desgaste conforme a una ley tipo Hollomon-Jaffe equivalente a la empleada para el cálculo de revenidos equivalentes.

Se puede concluir por tanto que los aceros ferritoperlíticos o bonificados para trabajo a desgaste a presiones bajas pueden ser sustituidos con ventaja por aceros austeníticos de bajo o medio manganeso, con ventajas crecientes cuando disminuye el tiempo de permanencia de la pieza a temperaturas elevadas.

Se puede suponer que, en aplicación del comportamiento tipo Hollomon-Jaffe, que la ventaja expresada anteriormente será de aplicación igualmente al disminuir la temperatura de trabajo

6. DESARROLLO FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN

Para optimizar los resultados se pueden realizar ensayos con más aleantes carburígenos fuertes en las composiciones. Los efectos sinérgicos de los aleantes pueden dar lugar a efectos muy superiores a los de los aleantes empleados individualmente.

Se puede ensayar también con otros aleantes gammágenos en sustitución de parte del cobre y/o manganeso por los mismos motivos expresados en el párrafo anterior.

Se puede ensayar a menor temperatura dada la importante ventaja que pueden tener estos aceros a temperaturas inferiores a las empleadas en este trabajo

Dados los buenos resultados obtenidos en los tratamientos hasta temperaturas bastante altas, se puede ensayar estos aceros a temperaturas ligeramente superiores.

Además, vistos los excelentes resultados de estas dos composiciones ensayadas, se podría realizar una caracterización mecánica y tribológica más extensa para su posible empleo en otras aplicaciones.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. W. Fairhurst y K. Rohrig “Abrasion Resistant High Chromium White Cast Irons”, Foundry Trade Journal, 1974.
2. ASM Metals Handbook, Vol. 1, 1978.
3. ASM Metals Handbook, Vol. 3, 1980.
4. ASM Metals Handbook, Vol. 7, 1984.
5. Physics and Chemistry Handbook, Chemical Rubber Company, 1972.
6. C.E. Diesburg y F Borik. “Optimizing Abrasion Resistance and Toughness in Steel and Irons for the Mining Industry”, Symposium: Materials for the Mining Industry, Climax Molybdenum Company, 1974.
7. J. Tasler “Austenitic Manganese Steel – Fact and Fallacy”, Intermountain Materials Symposium, Climax Molybdenum Company, 1982.
8. AWS Welding Handbook, Vol. 2, 1978.
9. ASM Metals Handbook, Vol. 2, 1978.
10. ASM Metals Handbook, Vol. 4, 1981.
11. American Gear Manufacturers Association Standard AGMA 240.01
12. ASM Metals Handbook, Vol. 1, 1978.
13. J. Dodd, D.J. Dunn, J.L.Huiatt y T.E. Norman, “Relative Importance of Abrasion and Corrosion in Metal Loss in Ball Milling”, Minerals and Metallurgical Processing, 1985.
14. R Bayer, Selection and Use of Wear Tests for Metals, STP615 ASTM, 1976.
15. F. Borik y D.L. Sponseller, “Gouging Abrasion Test for Materials Used in Ore and Rock Crushing: Part I – Description of the Test. Part II – Effect of Metallurgical Variables on Gouging Wear”, Journal of Metals, Vol. 6, 1971.
16. H.S. Avery, Wear, Vol. 4, 1961.

17. H.S. Avery, "Work Hardening in Relation to Abrasion Resistance", Symposium: Materials for the Mining Industry, Climax Molybdenum Company, 1974.
18. J. Muscara y M.J. Sinnott, "Construction and Evaluation of a Versatile Abrasive Wear Testing Apparatus", Metals Engineering Quarterly, Vol. 12, 1972.
19. J.L. Venne "Improved Steel Castings for Earth Moving" Intermountain Materials Symposium, Climax Molybdenum Company, 1982.
20. H.S. Avery, Discussion to Article in AIME Transactions, 1948.
21. D.L. Allbright y D.J. Dunn "Wear Behavior of Iron and Steel Castings for the Mining Industry", Journal of Metals, Vol. 18, 1983.
22. D.A. Stolk, "Field and Laboratory Abrasion Tests on Plowshares", Combined National Farm, Construction and Industrial Machinery and Powerplant Meeting, Milwaukee, 1970.
23. ASM Steel Castings Handbook, 1995.
24. J.L. Parks y D.M. Kjos, Annual Minnesota Section AIME Meeting, 1991.
25. L. Ferreiro, A. García, A. Varela, C. Camba, J.L. Mier y F. Barbadillo, "Correlación entre los resultados obtenidos mediante diversas técnicas de ensayo de desgaste". XVIII Congreso nacional de Ingeniería Mecánica, 2010
26. O.F. Higuera, C.M. Moreno, B.A. Suárez. "Evolución microestructural del acero austenítico al manganeso sometido a tratamiento térmico de temple y revenido". Revista de ingeniería de la universidad de Medellín. 2010
27. X. Jingpei, J. Quichuan, H. Zhenming, L. Quanshun y K. Sommer. "Mechanism of work hardening for austenitic manganese steel under non severe impact loading conditions". Chinese Journal of Metal Science Technology, 1992.
28. H.C. Doepken. "Tensile Properties of Wrought Austenitic Manganese Steel in the temperature Range from +100 to -196C", AIME Transactions, 1952.
29. C. H. White y R. W. K. Honeycombe, "Structural changes during deformation of high-purity Fe-Mn-C alloys", Journal of Iron and Steel Institute, 1962.

30. K. S. Raghavan, A.S. Sastri y M.J. Marcinkowski, "Nature of the Work Hardening Behavior in Hadfield's Manganese Steel", TMS-AIME Transactions, 1969.
31. O.O. Lambakakhar y Y.I. Paskal, "Dislocation structure and work-hardening of manganese steel", Russian Physics Journal, 1973.
32. D.J. Drobnjak y J.G. Parr, "Deformation substructure and strain-hardening characteristics of metastable Fe–Mn austenites", Metall Transactions, Vol. 1, 1970.
33. W.N. Roberts, "Deformation twinning in Hadfield steels", TMS-AIME Transactions, 1964.
34. C. H. White y R.W.K. Honeycombe, "Structural changes during deformation of high-purity Fe–Mn–C alloys", Journal of Iron and Steel Institute, 1962.
35. T. Saito, "The ϵ phase Formation Range of Fe – C - Mn Alloys under Quenching Conditions", Japanese Institute of Metals Transactions, Vol. 6, 1965.
36. G. Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, y M. Weisz, "Contribution a l'etude des transformations des austenites a 12% Mn", Revue de Metalurgie, Vol.54, 1957.
37. Dastur, Y. N. and W. C. Leslie, "Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel", Metallurgical Transactions, 1981.
38. Adler, P. H., G. B. Olson and W. S. Owen, "Strain hardening of Hadfield manganese steel", Metallurgical Transactions, Vol. 17A, 1986
39. J.W. Christian y S. Mahajan, "Deformation twinning", Progress in Materials Science, vol. 39, 1995.
40. H.C. Doepken, "Tensile Properties of Wrought Austenitic Manganese Steel in the Temperature Range from +100 to -196°C", AIME Transactions, 1952.
41. O. Grässel, O. Krüger, L.G. Frommeyer y L.W. Meyer, "High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application", International Journal of Plasticity, Vol. 16, 2000.
42. J. Friedel, Dislocations, Pergamon Press, 1964.

43. S. Allain, J.P. Chateau, O. Bouazizb, S. Migota, N. Gueltonb “Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanism in Fe – Mn – C alloys”, *Materials Science and Engineering A*, Vols. 387 – 389, 2004.
44. A. García, Á. Varela, J. L. Mier, C. Camba y F. Barbadillo “Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 46,2010.

ANEXO I. DUREZAS TRAS TRATAMIENTO TÉRMICO.

Nomenclatura:

M1, M2, M3, M4 y M5: Medidas de dureza.

MEDIA: Media de las medidas M1, M2, M3, M4 y M5.

DESV: Desviación típica de las medidas.

BC: Estado en bruto de colada.

HT AGUA: Hipertemple a 1100°C durante 2 horas y enfriamiento en agua.

HT AIRE: Hipertemple a 1100°C durante 2 horas y enfriamiento en aire.

100 .. 900: Hipertemple a 1100°C durante 2 horas y enfriamiento en aire seguido de recocido durante otras 2 horas a la temperatura indicada con enfriamiento posterior en aire.

Estado 3: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	226	226	223	223	223	224,2	1,64
2	229	227	229	229	223	227,4	2,61
3	226	232	241	229	229	231,4	5,77
4	543	540	529	568	542	544,4	14,33
5	270	299	285	277	285	283,2	10,83
6	406	432	401	388	415	408,4	16,41
7	250	234	235	248	235	240,4	7,89
8	235	237	235	229	348	256,8	51,07
9	229	226	223	223	229	226	3,00
10	227	226	229	229	223	226,8	2,49

**Estado 4: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 100°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	248	248	241	241	248	245,2	3,83
2	248	262	255	255	248	253,6	5,86
3	269	506	269	262	277	316,6	106,01
4	495	506	517	517	517	510,4	9,84
5	223	255	255	229	248	242	15,03
6	255	255	248	255	255	253,6	3,13
7	311	341	341	341	321	331	14,14
8	285	353	341	311	311	320,2	27,00
9	285	311	277	277	294	288,8	14,25
10	331	321	321	353	331	331,4	13,07

**Estado 5: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 150°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	262	248	248	262	302	264,4	22,15
2	302	331	294	294	299	304	15,48
3	294	294	302	302	321	302,6	11,04
4	401	429	429	440	429	425,6	14,55
5	311	311	311	311	321	313	4,47
6	285	277	277	376	285	300	42,67
7	331	331	341	341	331	335	5,48
8	285	262	248	255	262	262,4	13,90
9	311	311	311	331	294	311,6	13,11
10	353	363	363	341	341	352,2	11,01

**Estado 6: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 200°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	223	223	229	223	229	225,4	3,29
2	235	235	235	241	235	236,2	2,68
3	235	235	235	229	235	233,8	2,68
4	388	376	376	376	388	380,8	6,57
5	229	235	226	229	223	228,4	4,45
6	255	294	294	255	241	267,8	24,59
7	235	255	241	235	241	241,4	8,17
8	255	235	235	235	235	239	8,94
9	255	261	262	262	262	260,4	3,05
10	285	277	285	285	285	283,4	3,58

**Estado 9: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 350°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	229	223	241	235	229	231,4	6,84
2	235	235	229	235	241	235	4,24
3	241	241	363	241	241	265,4	54,56
4	376	401	363	363	363	373,2	16,53
5	255	248	248	248	255	250,8	3,83
6	248	255	262	262	241	253,6	9,13
7	241	248	248	248	248	246,6	3,13
8	255	262	255	248	269	257,8	7,98
9	255	255	262	262	255	257,8	3,83
10	311	321	302	321	311	313,2	8,01

**Estado 10: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 400°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	229	229	229	235	229	230,2	2,68
2	229	223	223	223	223	224,2	2,68
3	229	229	229	229	235	230,2	2,68
4	376	376	376	376	376	376	0,00
5	241	248	248	241	241	243,8	3,83
6	248	241	248	255	241	246,6	5,86
7	248	248	248	229	241	242,8	8,29
8	241	277	269	269	269	265	13,86
9	262	262	248	255	262	257,8	6,26
10	262	262	269	269	262	264,8	3,83

**Estado 11: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 450°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	229	229	229	235	229	230,2	2,68
2	229	229	229	223	223	226,6	3,29
3	235	235	229	229	235	232,6	3,29
4	376	376	376	376	321	365	24,60
5	241	241	255	235	241	242,6	7,40
6	321	331	341	331	321	329	8,37
7	277	255	248	241	248	253,8	13,88
8	248	255	248	248	255	250,8	3,83
9	248	248	255	248	248	249,4	3,13
10	277	285	285	285	285	283,4	3,58

**Estado 12: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 500°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	229	229	229	229	229	229	0,00
2	235	229	235	235	229	232,6	3,29
3	235	235	229	229	235	232,6	3,29
4	376	388	376	376	376	378,4	5,37
5	235	235	229	235	235	233,8	2,68
6	229	223	229	229	229	227,8	2,68
7	262	262	265	269	269	265,4	3,51
8	262	262	255	262	262	260,6	3,13
9	255	255	255	255	255	255	0,00
10	255	255	248	255	255	253,6	3,13

**Estado 15: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 650°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	262	255	285	277	255	266,8	13,57
2	285	294	295	302	285	292,2	7,26
3	429	429	429	429	429	429	0,00
4	415	429	415	429	415	420,6	7,67
5	542	555	581	581	568	565,4	16,95
6	321	321	311	321	321	319	4,47
7	331	321	341	341	331	333	8,37
8	376	376	401	376	376	381	11,18
9	341	331	331	321	341	333	8,37
10	401	415	401	401	401	403,8	6,26

**Estado 16: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 700°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	229	235	229	241	248	236,4	8,17
2	255	262	262	255	262	259,2	3,83
3	424	415	401	415	429	416,8	10,69
4	429	440	401	401	401	414,4	18,76
5	484	495	484	473	484	484	7,78
6	376	376	376	341	388	371,4	17,77
7	294	302	294	294	294	295,6	3,58
8	277	285	277	277	285	280,2	4,38
9	285	285	285	285	285	285	0,00
10	341	341	321	341	341	337	8,94

**Estado 17: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 750°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	262	262	269	269	269	266,2	3,83
2	277	285	277	255	277	274,2	11,28
3	401	277	353	391	388	362	50,85
4	363	376	376	376	376	373,4	5,81
5	595	581	581	595	581	586,6	7,67
6	376	388	388	388	401	388,2	8,84
7	285	277	269	294	285	282	9,43
8	331	353	353	341	341	343,8	9,34
9	321	321	321	321	321	321	0,00
10	363	353	341	341	341	347,8	9,96

**Estado 18: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 800°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	262	255	255	262	262	259,2	3,83
2	255	255	255	248	255	253,6	3,13
3	294	353	311	311	294	312,6	24,13
4	542	542	529	542	529	536,8	7,12
5	581	610	581	568	581	584,2	15,48
6	353	353	353	388	353	360	15,65
7	294	302	294	285	285	292	7,18
8	331	331	331	331	321	329	4,47
9	321	321	321	321	321	321	0,00
10	363	341	353	363	353	354,6	9,10

**Estado 19: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 850°C /2h y enfriamiento en aire.**

Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	277	297	277	277	277	281	8,94
2	255	255	262	255	255	256,4	3,13
3	294	302	294	294	302	297,2	4,38
4	473	529	529	517	517	513	23,15
5	353	353	363	363	353	357	5,48
6	363	353	353	363	363	359	5,48
7	341	341	331	341	341	339	4,47
8	331	331	331	341	331	333	4,47
9	331	331	331	341	321	331	7,07
10	363	341	353	363	353	354,6	9,10

**Estado 20: Hipertemple a 1100°C / 2h y enfriamiento en aire.
Recocido a 900°C /2h y enfriamiento en aire.**

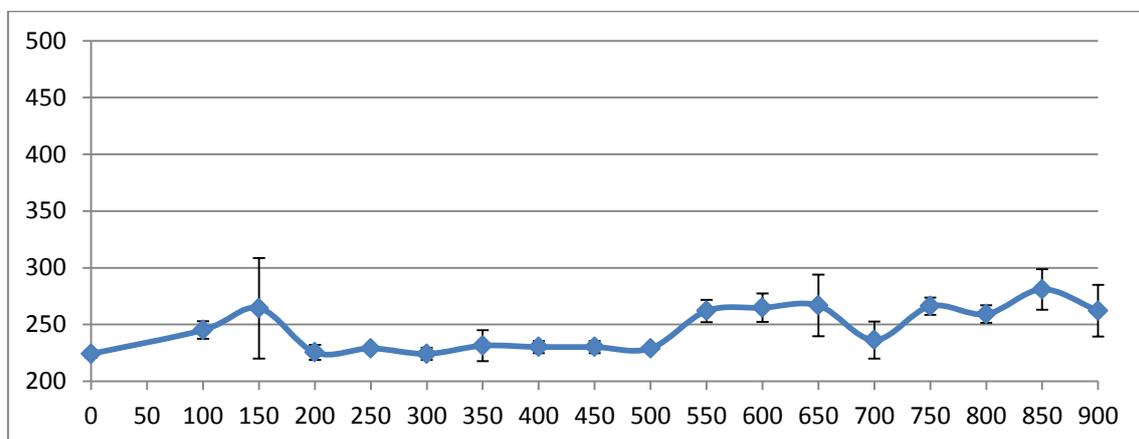
Colada	M1	M2	M3	M4	M5	Media	Desv
1	269	255	248	277	262	262,2	11,39
2	294	285	294	294	294	292,2	4,02
3	294	302	302	294	302	298,8	4,38
4	495	495	495	495	473	490,6	9,84
5	262	262	269	262	262	263,4	3,13
6	311	302	311	311	321	311,2	6,72
7	341	353	341	321	331	337,4	12,03
8	269	262	269	269	269	267,6	3,13
9	294	302	285	294	341	303,2	21,97
10	285	285	285	285	294	286,8	4,02

Durezas por colada

Colada 1

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

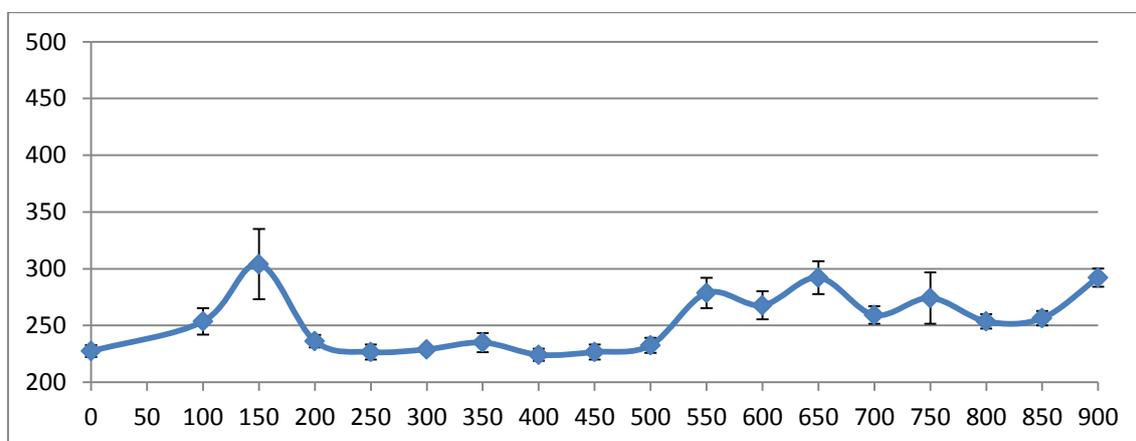
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	262	262	277	285	255	268,2	12,36
HT AGUA	229	229	235	229	235	231,4	3,29
HT AIRE	226	226	223	223	223	224,2	1,64
100	248	248	241	241	248	245,2	3,83
150	262	248	248	262	302	264,4	22,15
200	223	223	229	223	229	225,4	3,29
250	229	229	229	229	229	229	0,00
300	223	229	223	223	223	224,2	2,68
350	229	223	241	235	229	231,4	6,84
400	229	229	229	235	229	230,2	2,68
450	229	229	229	235	229	230,2	2,68
500	229	229	229	229	229	229	0,00
550	262	255	262	262	269	262	4,95
600	262	269	269	255	269	264,8	6,26
650	262	255	285	277	255	266,8	13,57
700	229	235	229	241	248	236,4	8,17
750	262	262	269	269	269	266,2	3,83
800	262	255	255	262	262	259,2	3,83
850	277	297	277	277	277	281	8,94
900	269	255	248	277	262	262,2	11,39



Colada 2

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

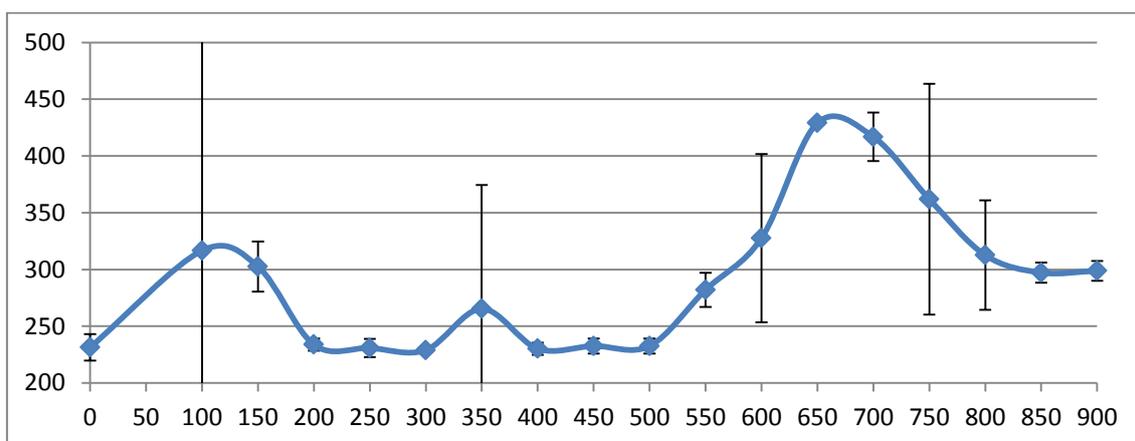
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	229	235	235	235	235	233,8	2,68
HT AGUA	223	223	223	223	223	223	0,00
HT AIRE	229	227	229	229	223	227,4	2,61
100	248	262	255	255	248	253,6	5,86
150	302	331	294	294	299	304	15,48
200	235	235	235	241	235	236,2	2,68
250	223	229	229	223	229	226,6	3,29
300	229	229	229	229	229	229	0,00
350	235	235	229	235	241	235	4,24
400	229	223	223	223	223	224,2	2,68
450	229	229	229	223	223	226,6	3,29
500	235	229	235	235	229	232,6	3,29
550	277	277	285	285	269	278,6	6,69
600	269	262	262	269	277	267,8	6,22
650	285	294	295	302	285	292,2	7,26
700	255	262	262	255	262	259,2	3,83
750	277	285	277	255	277	274,2	11,28
800	255	255	255	248	255	253,6	3,13
850	255	255	262	255	255	256,4	3,13
900	294	285	294	294	294	292,2	4,02



Colada 3

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	229	223	223	223	223	224,2	2,68
HT AGUA	229	229	229	241	229	231,4	5,37
HT AIRE	226	232	241	229	229	231,4	5,77
100	269	506	269	262	277	316,6	106,01
150	294	294	302	302	321	302,6	11,04
200	235	235	235	229	235	233,8	2,68
250	229	235	235	226	229	230,8	4,02
300	229	229	229	229	229	229	0,00
350	241	241	363	241	241	265,4	54,56
400	229	229	229	229	235	230,2	2,68
450	235	235	229	229	235	232,6	3,29
500	235	235	229	229	235	232,6	3,29
550	285	277	277	294	277	282	7,55
600	341	262	341	341	353	327,6	37,04
650	429	429	429	429	429	429	0,00
700	424	415	401	415	429	416,8	10,69
750	401	277	353	391	388	362	50,85
800	294	353	311	311	294	312,6	24,13
850	294	302	294	294	302	297,2	4,38
900	294	302	302	294	302	298,8	4,38

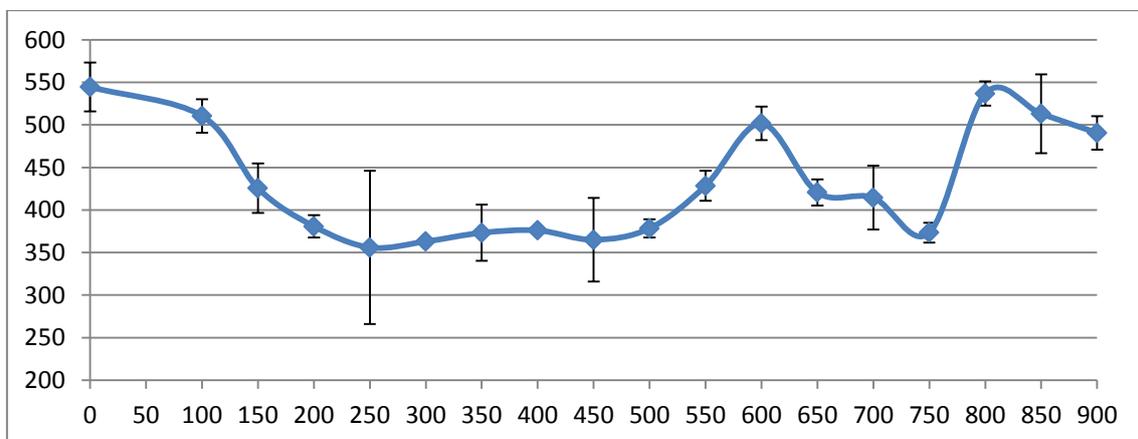


Existe algún valor atípico (100°C y 350°C) en los que no se ha repetido la medida al descartarse la aleación.

Colada 4

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	473	440	451	484	462	462	17,39
HT AGUA	555	555	555	248	555	493,6	137,29
HT AIRE	543	540	529	568	542	544,4	14,33
100	495	506	517	517	517	510,4	9,84
150	401	429	429	440	429	425,6	14,55
200	388	376	376	376	388	380,8	6,57
250	376	277	376	363	388	356	45,04
300	363	363	363	363	363	363	0,00
350	376	401	363	363	363	373,2	16,53
400	376	376	376	376	376	376	0,00
450	376	376	376	376	321	365	24,60
500	376	388	376	376	376	378,4	5,37
550	429	415	429	440	429	428,4	8,88
600	517	506	495	495	495	501,6	9,84
650	415	429	415	429	415	420,6	7,67
700	429	440	401	401	401	414,4	18,76
750	363	376	376	376	376	373,4	5,81
800	542	542	529	542	529	536,8	7,12
850	473	529	529	517	517	513	23,15
900	495	495	495	495	473	490,6	9,84

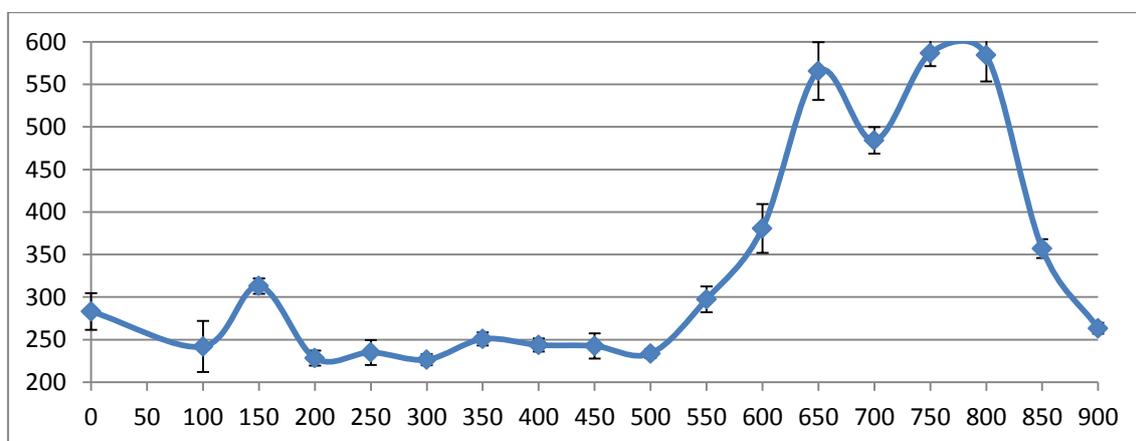


Nótese que se ha cambiado el valor superior de la escala de durezas en la gráfica para acomodar los valores más altos.

Colada 5

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	285	285	285	285	285	285	0,00
HT AGUA	294	294	294	294	294	294	0,00
HT AIRE	270	299	285	277	285	283,2	10,83
100	223	255	255	229	248	242	15,03
150	311	311	311	311	321	313	4,47
200	229	235	226	229	223	228,4	4,45
250	241	223	235	241	235	235	7,35
300	223	229	229	223	229	226,6	3,29
350	255	248	248	248	255	250,8	3,83
400	241	248	248	241	241	243,8	3,83
450	241	241	255	235	241	242,6	7,40
500	235	235	229	235	235	233,8	2,68
550	294	294	311	294	294	297,4	7,60
600	401	376	388	363	376	380,8	14,34
650	542	555	581	581	568	565,4	16,95
700	484	495	484	473	484	484	7,78
750	595	581	581	595	581	586,6	7,67
800	581	610	581	568	581	584,2	15,48
850	353	353	363	363	353	357	5,48
900	262	262	269	262	262	263,4	3,13

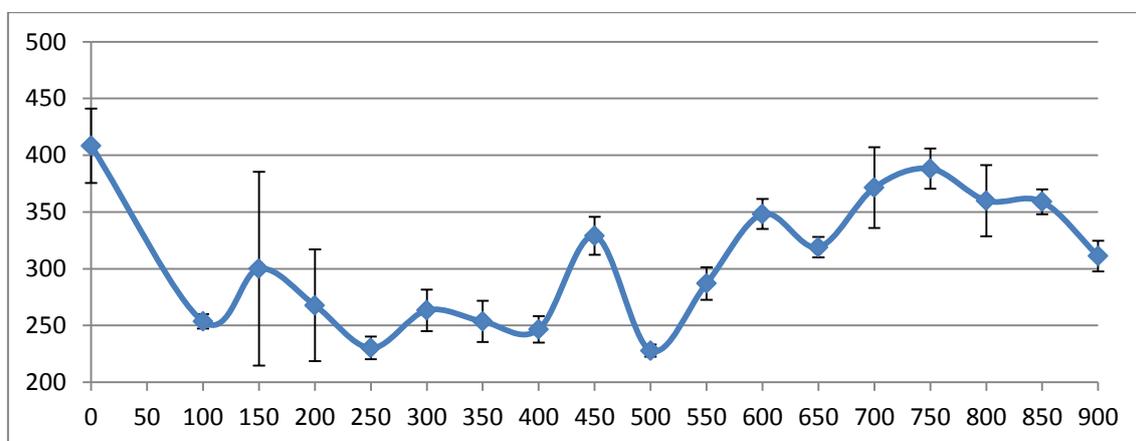


Nótese que se ha cambiado el valor superior de la escala de durezas en la gráfica para acomodar los valores más altos.

Colada 6

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

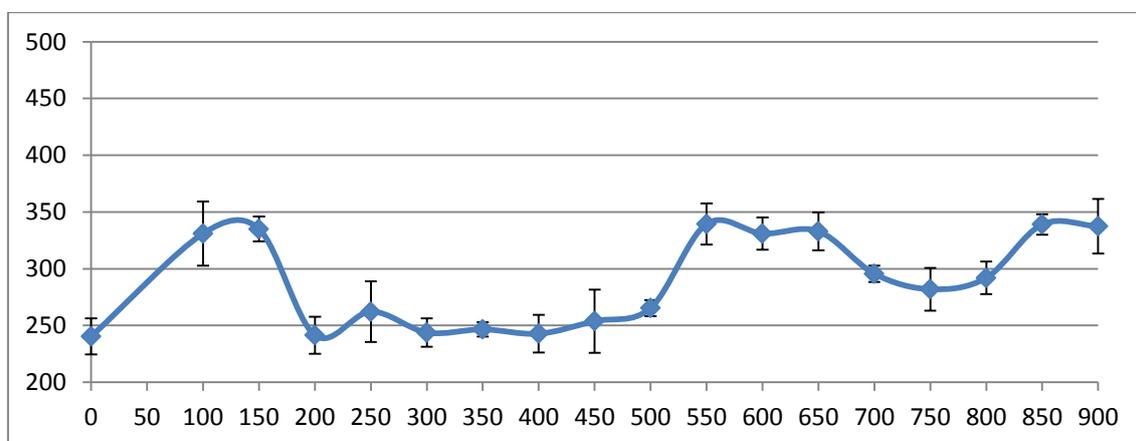
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	294	321	321	341	311	317,6	17,11
HT AGUA	321	331	311	285	321	313,8	17,58
HT AIRE	406	432	401	388	415	408,4	16,41
100	255	255	248	255	255	253,6	3,13
150	285	277	277	376	285	300	42,67
200	255	294	294	255	241	267,8	24,59
250	235	229	223	235	229	230,2	5,02
300	269	248	262	269	269	263,4	9,13
350	248	255	262	262	241	253,6	9,13
400	248	241	248	255	241	246,6	5,86
450	321	331	341	331	321	329	8,37
500	229	223	229	229	229	227,8	2,68
550	285	285	294	294	277	287	7,18
600	353	353	353	341	341	348,2	6,57
650	321	321	311	321	321	319	4,47
700	376	376	376	341	388	371,4	17,77
750	376	388	388	388	401	388,2	8,84
800	353	353	353	388	353	360	15,65
850	363	353	353	363	363	359	5,48
900	311	302	311	311	321	311,2	6,72



Colada 7

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

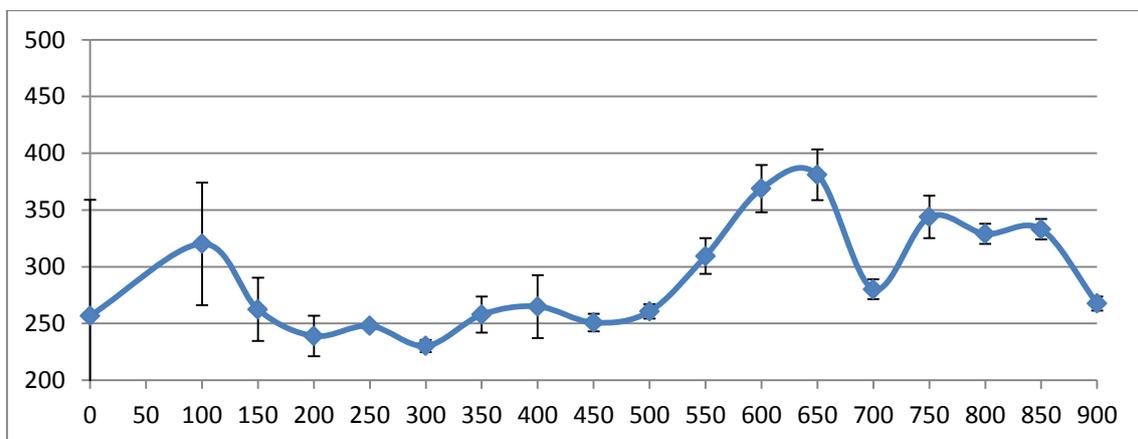
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	246	311	311	302	294	292,8	27,11
HT AGUA	223	223	223	223	223	223	0,00
HT AIRE	250	234	235	248	235	240,4	7,89
100	311	341	341	341	321	331	14,14
150	331	331	341	341	331	335	5,48
200	235	255	241	235	241	241,4	8,17
250	262	277	269	262	241	262,2	13,37
300	241	241	255	241	241	243,8	6,26
350	241	248	248	248	248	246,6	3,13
400	248	248	248	229	241	242,8	8,29
450	277	255	248	241	248	253,8	13,88
500	262	262	265	269	269	265,4	3,51
550	331	331	341	353	341	339,4	9,10
600	331	331	331	341	321	331	7,07
650	331	321	341	341	331	333	8,37
700	294	302	294	294	294	295,6	3,58
750	285	277	269	294	285	282	9,43
800	294	302	294	285	285	292	7,18
850	341	341	331	341	341	339	4,47
900	341	353	341	321	331	337,4	12,03



Colada 8

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1,5	1

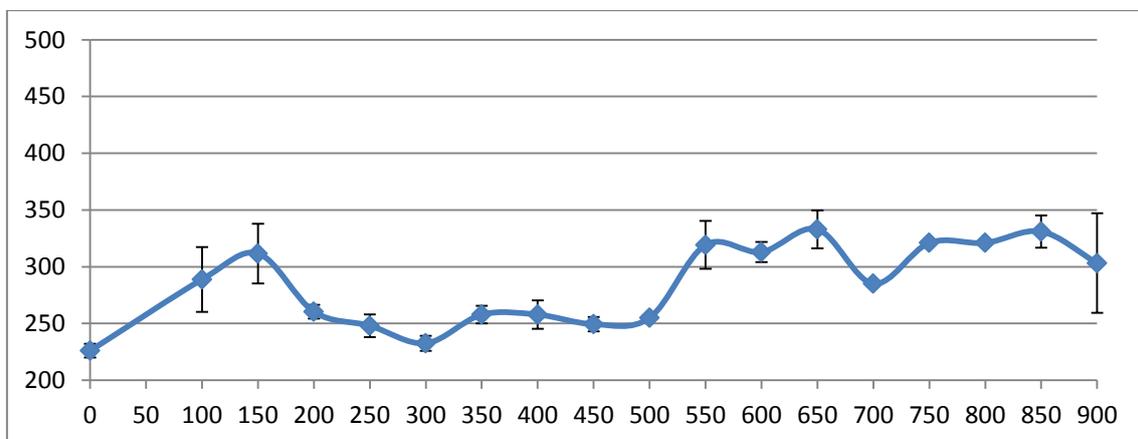
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	246	255	241	248	248	247,6	5,03
HT AGUA	223	223	223	223	223	223	0,00
HT AIRE	235	237	235	229	348	256,8	51,07
100	285	353	341	311	311	320,2	27,00
150	285	262	248	255	262	262,4	13,90
200	255	235	235	235	235	239	8,94
250	248	248	248	248	248	248	0,00
300	229	229	235	229	229	230,2	2,68
350	255	262	255	248	269	257,8	7,98
400	241	277	269	269	269	265	13,86
450	248	255	248	248	255	250,8	3,83
500	262	262	255	262	262	260,6	3,13
550	302	302	311	321	311	309,4	7,89
600	376	363	376	376	353	368,8	10,47
650	376	376	401	376	376	381	11,18
700	277	285	277	277	285	280,2	4,38
750	331	353	353	341	341	343,8	9,34
800	331	331	331	331	321	329	4,47
850	331	331	331	341	331	333	4,47
900	269	262	269	269	269	267,6	3,13



Colada 9

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

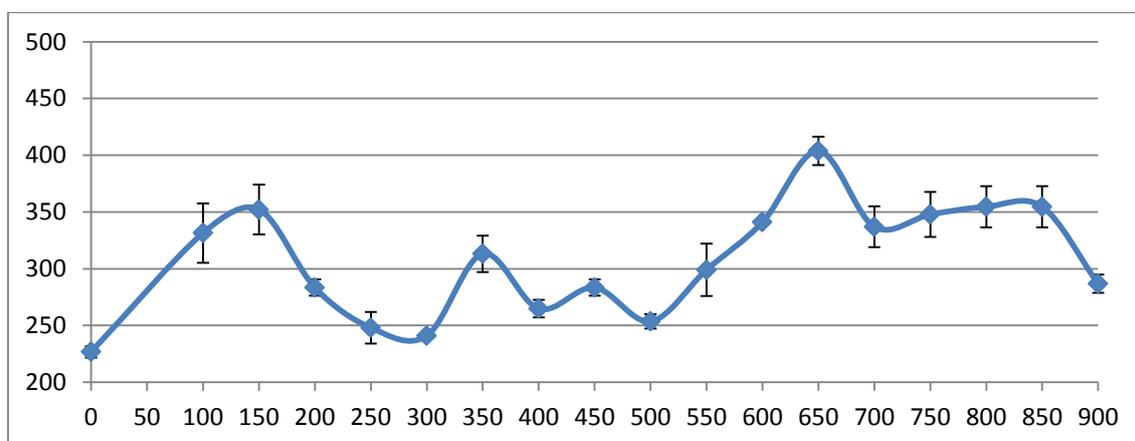
TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	294	269	262	277	294	279,2	14,52
HT AGUA	229	235	223	235	235	231,4	5,37
HT AIRE	229	226	223	223	229	226	3,00
100	285	311	277	277	294	288,8	14,25
150	311	311	311	331	294	311,6	13,11
200	255	261	262	262	262	260,4	3,05
250	248	241	248	255	248	248	4,95
300	235	235	229	229	235	232,6	3,29
350	255	255	262	262	255	257,8	3,83
400	262	262	248	255	262	257,8	6,26
450	248	248	255	248	248	249,4	3,13
500	255	255	255	255	255	255	0,00
550	321	302	331	321	321	319,2	10,55
600	311	311	311	311	321	313	4,47
650	341	331	331	321	341	333	8,37
700	285	285	285	285	285	285	0,00
750	321	321	321	321	321	321	0,00
800	321	321	321	321	321	321	0,00
850	331	331	331	341	321	331	7,07
900	294	302	285	294	341	303,2	21,97



Colada 10

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

TRATAM	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	DESV
BC	294	321	331	353	331	326	21,38
HT AGUA	223	223	223	223	223	223	0,00
HT AIRE	227	226	229	229	223	226,8	2,49
100	331	321	321	353	331	331,4	13,07
150	353	363	363	341	341	352,2	11,01
200	285	277	285	285	285	283,4	3,58
250	241	255	255	241	248	248	7,00
300	241	241	241	241	241	241	0,00
350	311	321	302	321	311	313,2	8,01
400	262	262	269	269	262	264,8	3,83
450	277	285	285	285	285	283,4	3,58
500	255	255	248	255	255	253,6	3,13
550	294	311	311	294	285	299	11,55
600	341	341	341	341	341	341	0,00
650	401	415	401	401	401	403,8	6,26
700	341	341	321	341	341	337	8,94
750	363	353	341	341	341	347,8	9,96
800	363	341	353	363	353	354,6	9,10
850	363	341	353	363	353	354,6	9,10
900	285	285	285	285	294	286,8	4,02



ANEXO II. PROBETAS TRATADAS.

Observaciones generales

Todas las probetas se han cortado con tronzadora metalográfica refrigeradas con taladrina.

Se ha realizado un lijado húmedo y un pulido manual con alúmina de distintos tamaños.

El ataque se realizó con nital 3

La observación se realizó en un microscopio óptico entre 50 y 500 aumentos con luz polarizada y algunas con un prisma Normaski.

En todas las probetas de todos los aceros se han encontrado constituyentes tales como sulfuros de manganeso y otras inclusiones no metálicas, carburos dispersos redondeados y de pequeño tamaño y microporosidad o rechupes típicos de piezas fundidas.

Sólo se reseñarán los elementos anteriores cuando su cantidad, morfología o distribución sea significativamente distinta a lo normal.

Probeta 1.1. Colada 1 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

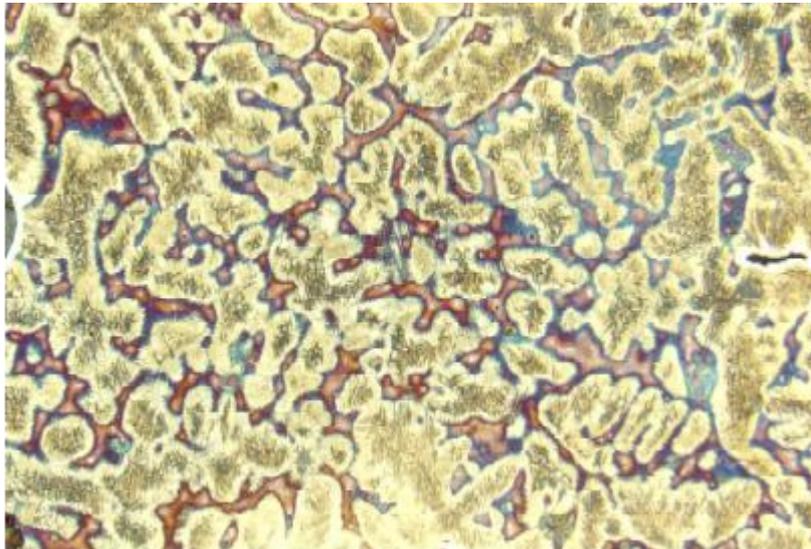
Dureza:

Media: 245 HB

Microestructura:

Martensita dispersa en los troncos dendríticos con menor cantidad de manganeso debido a la microsegregación, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios.

Imagen:



Comentarios:

Probeta no significativamente más dura que el estado hipertemplado. La matriz de austenita retenida asegura una buena tenacidad. El coring muestra la microsegregación del manganeso.

Probeta 1.2. Colada 1 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

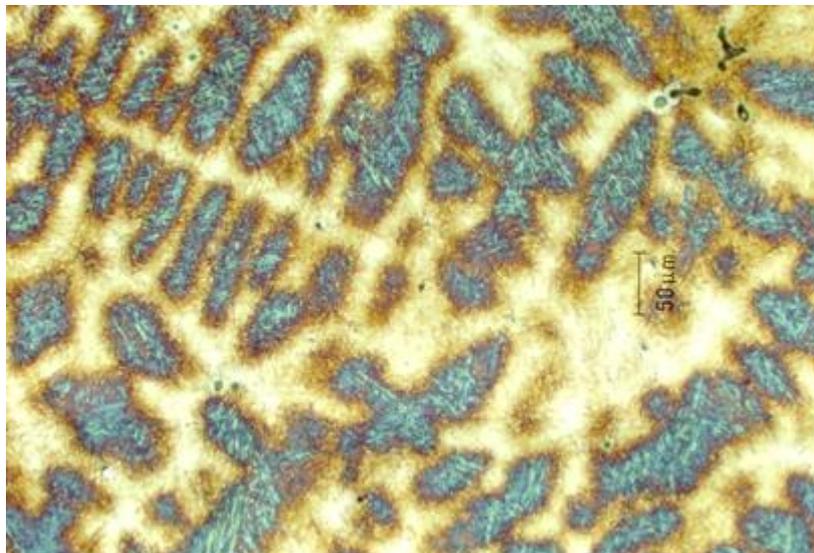
Dureza:

Media: 264 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja dispersa. Austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta no significativamente más dura que el estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior. Una pequeña fracción de carburos pequeños y dispersos en la austenita no afectan demasiado a la tenacidad del material.

Probeta 1.3. Colada 1 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

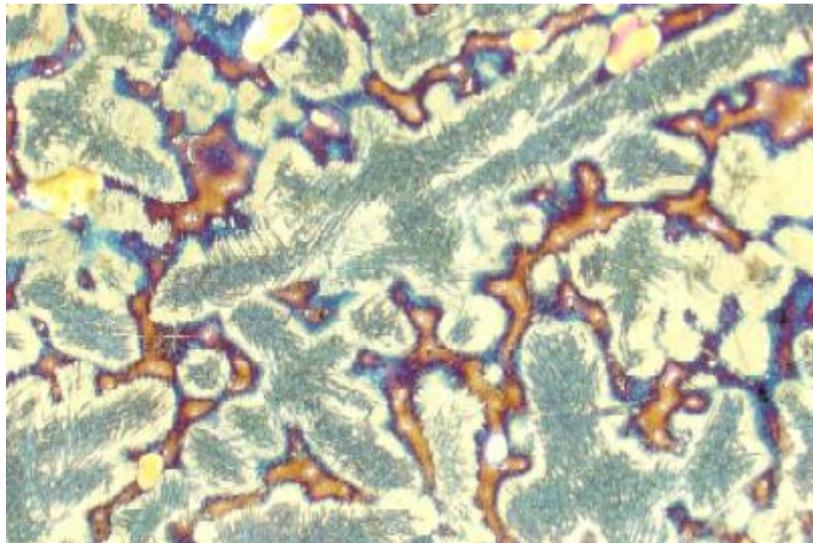
Dureza:

Media: 225 HB

Microestructura:

Martensita dispersa revenida baja. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. La elevación de la temperatura de tratamiento finaliza la dureza extra del revenido bajo.

Probeta 1.4. Colada 1 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

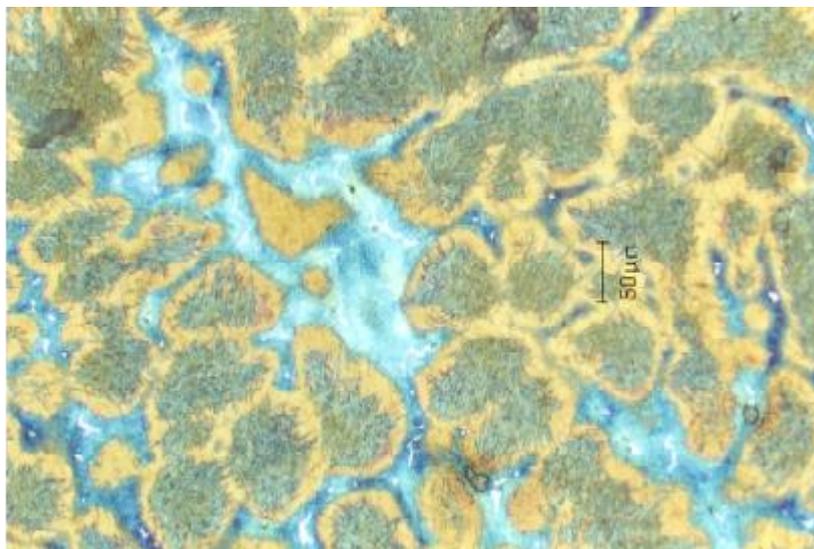
Dureza:

Media: 229 HB

Microestructura:

Martensita dispersa revenida baja en los troncos dendríticos, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.5. Colada 1 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

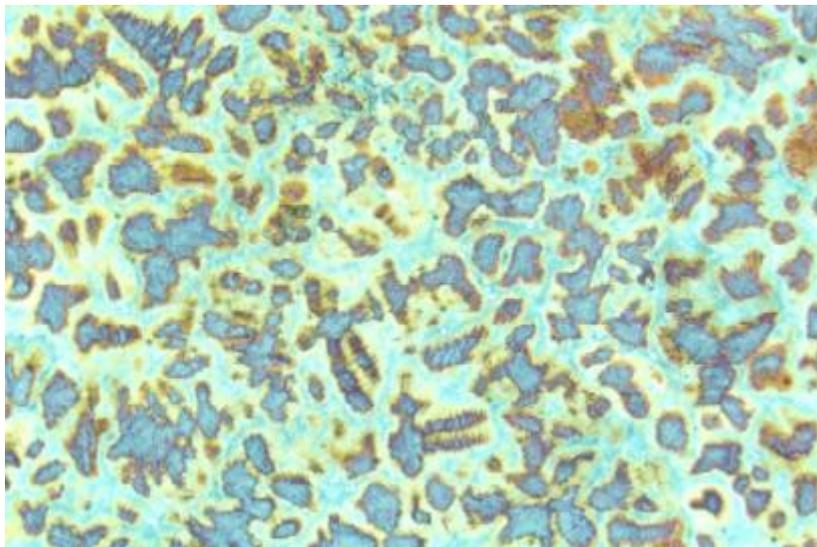
Dureza:

Media: 224 HB

Microestructura:

Martensita dispersa en los troncos dendríticos, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.6. Colada 1 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

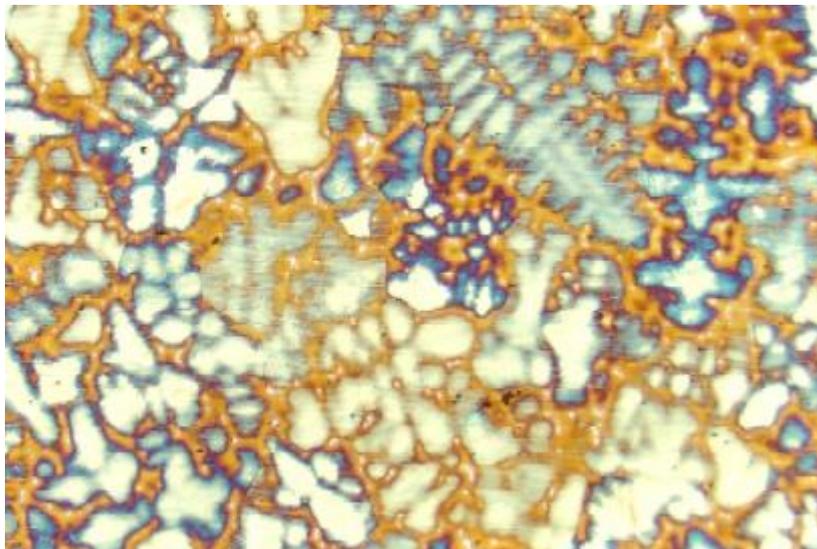
Dureza:

Media: 231 HB

Microestructura:

Martensita dispersa con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.7. Colada 1 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

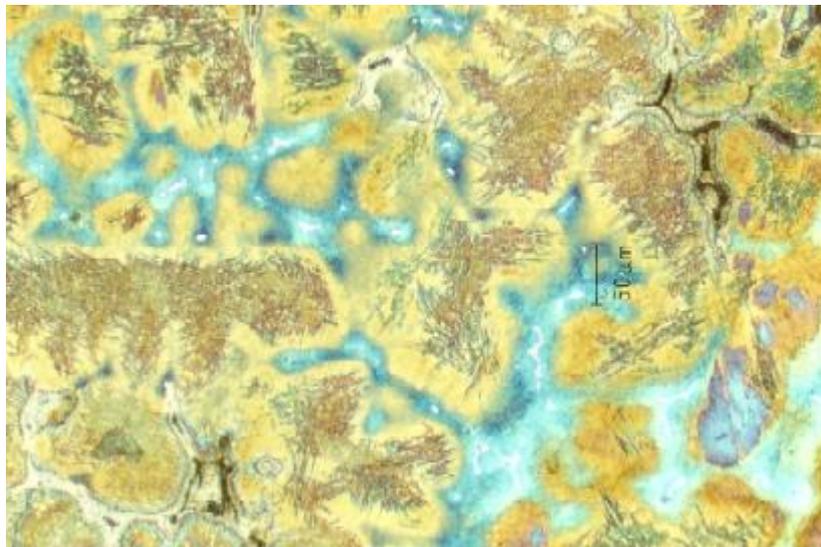
Dureza:

Media: 230 HB

Microestructura:

Martensita dispersa con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.8. Colada 1 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire.

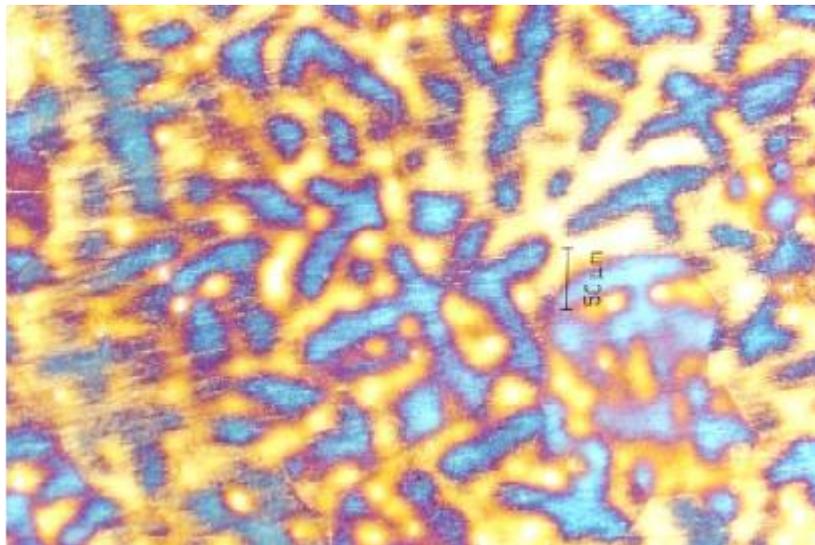
Dureza:

Media: 230 HB

Microestructura:

Martensita dispersa, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.9. Colada 1 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

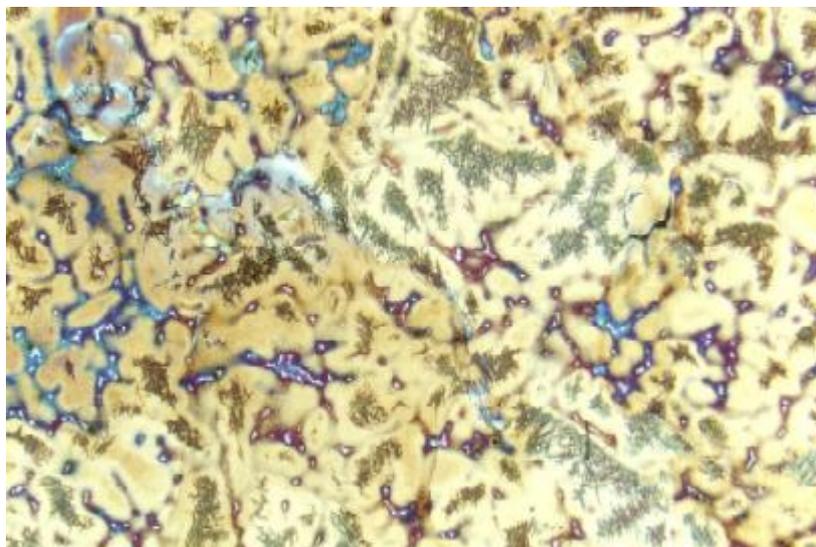
Dureza:

Media: 229 HB

Microestructura:

Martensita revenida y algunas perlitas dispersas con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza igual a la del estado hipertemplado. Comienza la aparición de pequeñas cantidades apreciables de perlita sin que afecten significativamente a la dureza.

Probeta 1.10. Colada 1 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

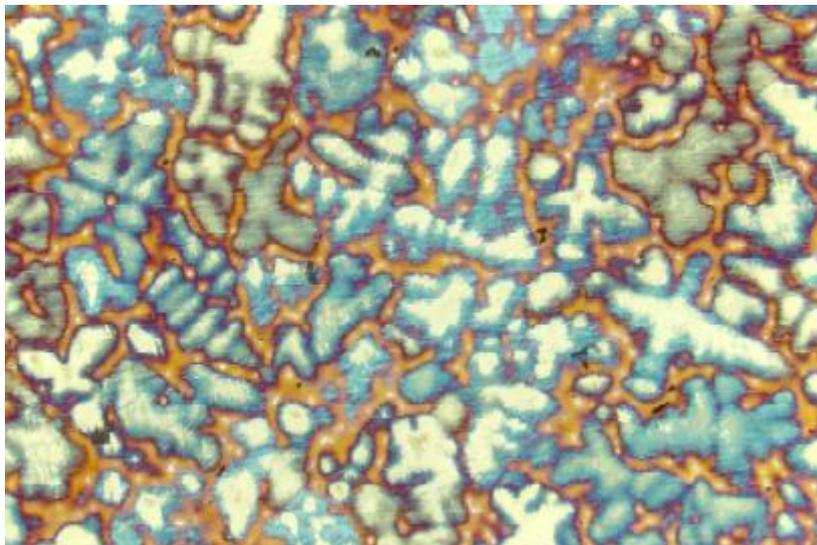
Dureza:

Media: 262 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlitas dispersas, con suficiente cantidad de austenita retenida.
Austenita como matriz en los espacios interdendríticos con algunas zonas de bainita.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. La presencia más abundante de perlitas endurece ligeramente el acero.

Probeta 1.11. Colada 1 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

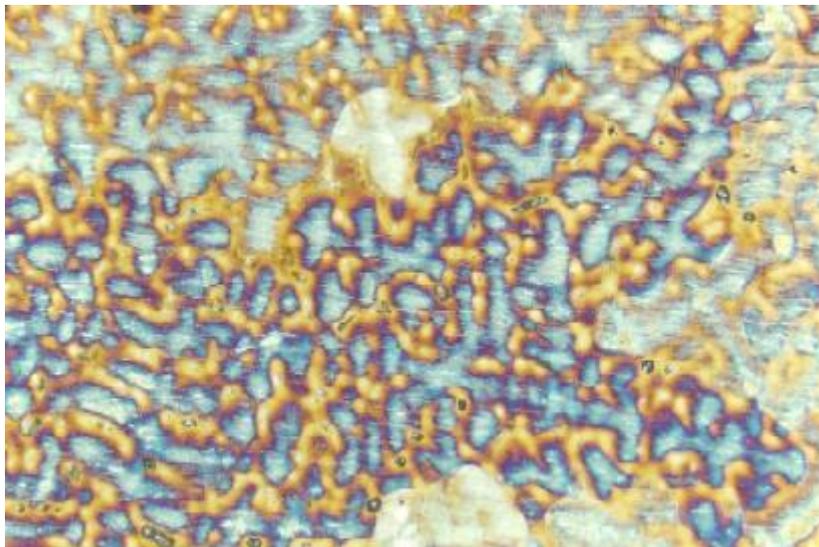
Dureza:

Media: 265 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlitas dispersas con suficiente cantidad de austenita retenida.
Austenita como matriz en los espacios interdendríticos con algunas zonas de bainita.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la anterior.

Probeta 1.12. Colada 1 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

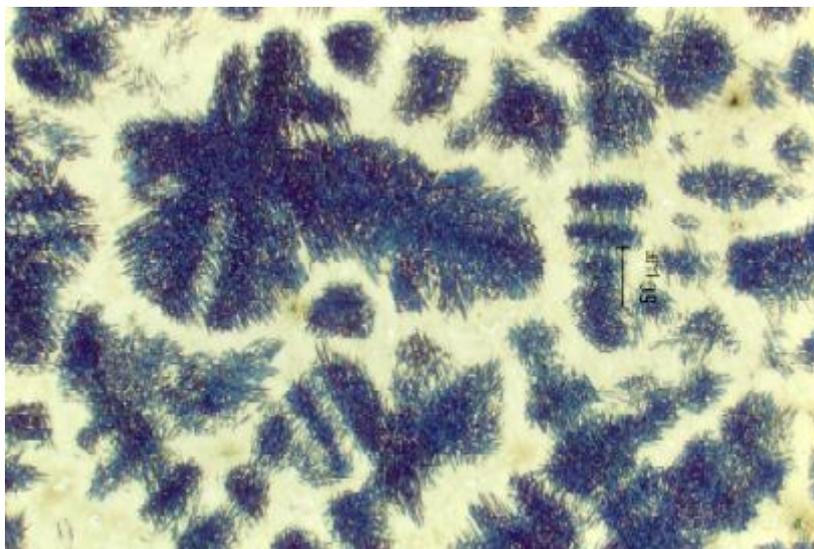
Dureza:

Media: 267 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita fina dispersas en los troncos dendríticos, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la anterior. La alta temperatura de revenido para la martensita la hace ya difícilmente distinguible de la perlita.

Probeta 1.13. Colada 1 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

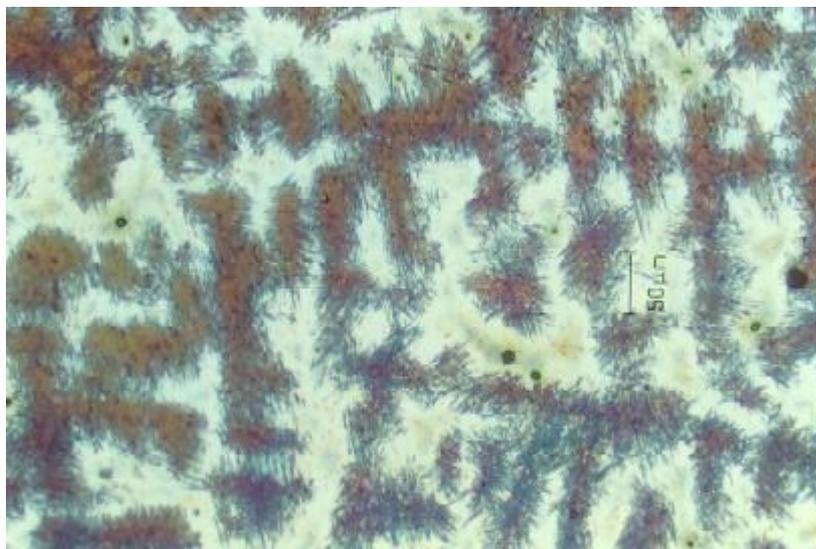
Dureza:

Media: 236 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita dispersas en los troncos dendríticos, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. La alta temperatura de revenido y la menor cantidad de perlita y su mayor espaciado interlaminar ablandan el acero con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 1.14. Colada 1 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

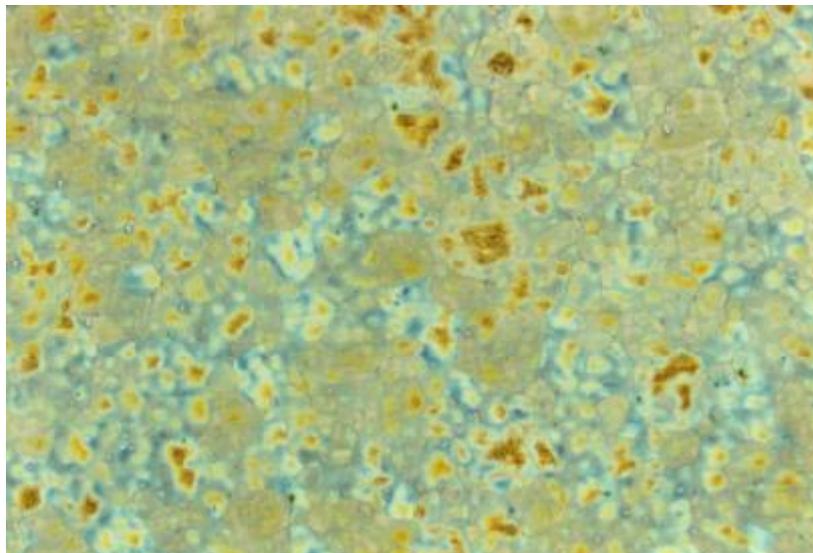
Dureza:

Media: 266 HB

Microestructura:

Austenita como matriz. Algunas zonas de martensita sin revenir.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. La reaustenización parcial de las zonas martensíticas del hipertemple hacen que reaparezca martensita sin revenir.

Probeta 1.15. Colada 1 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

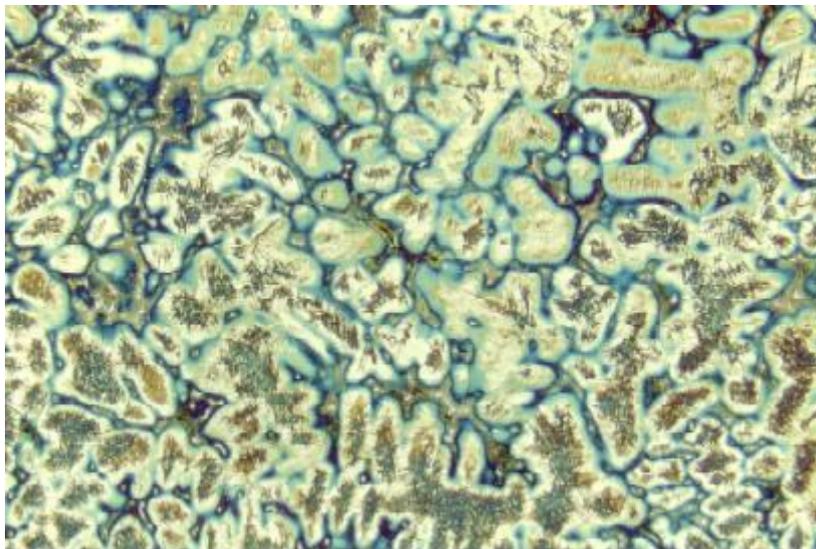
Dureza:

Media: 259 HB

Microestructura:

Austenita como matriz. Algunas zonas de martensita sin revenir.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. La extensión de las zonas de martensita es ligeramente superior a las de la probeta anterior.

Probeta 1.16. Colada 1 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

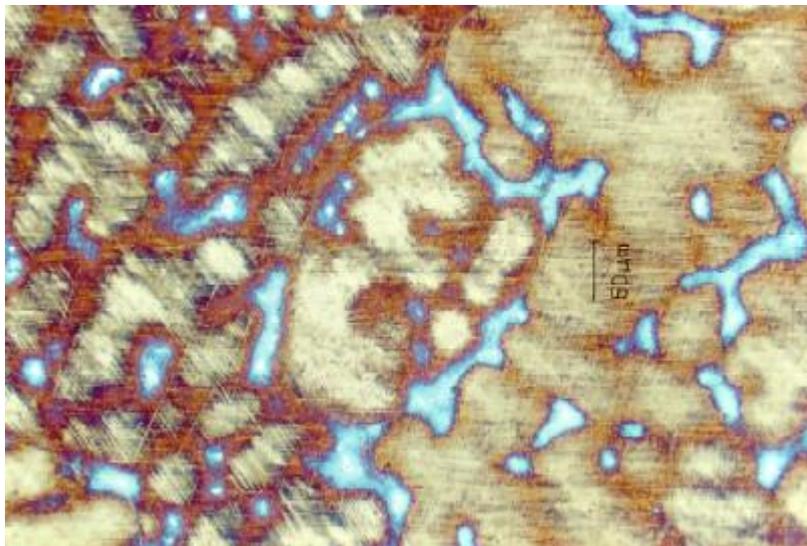
Dureza:

Media: 281 HB

Microestructura:

Austenita como matriz. Martensita sin revenir y carburos dispersos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La extensión de las zonas de martensita es nuevamente superior a las de la probeta anterior. La heterogeneidad menor se ha atenuado significativamente redondeando los troncos dendríticos. La elevación de la temperatura ha hecho crecer el tamaño de los carburos.

Probeta 1.17. Colada 1 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	8	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

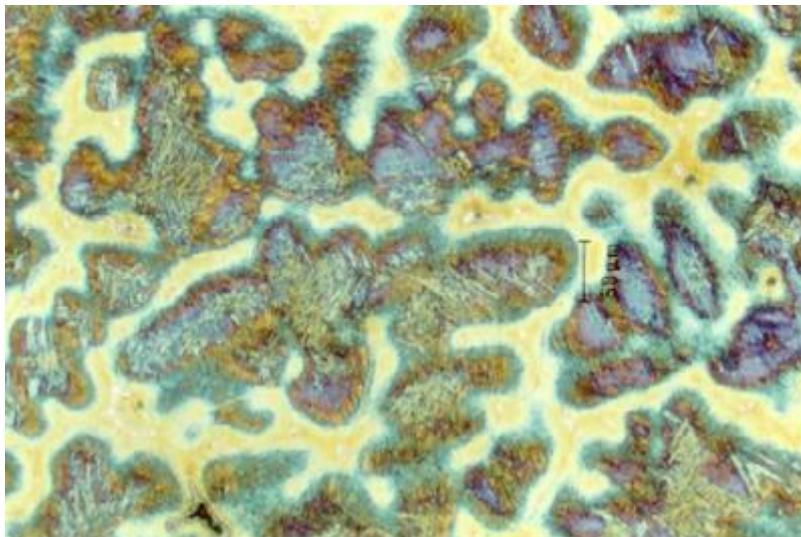
Dureza:

Media: 262 HB

Microestructura:

Austenita como matriz. Martensita sin revenir y carburos dispersos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios importantes con respecto a la probeta anterior.

Probeta 2.1. Colada 2 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

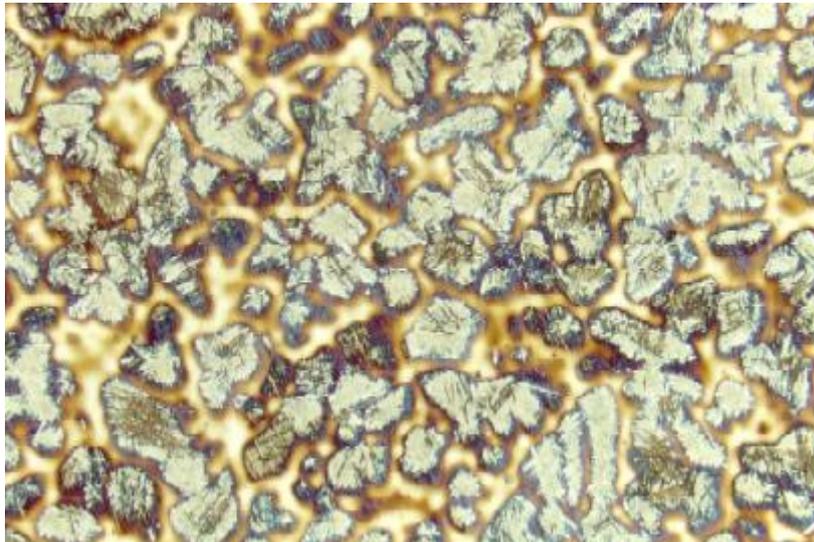
Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita dispersa en los troncos dendríticos con menor cantidad de manganeso debido a la microsegregación, con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. La gran cantidad de austenita como matriz asegura la tenacidad.

Probeta 2.2. Colada 2 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

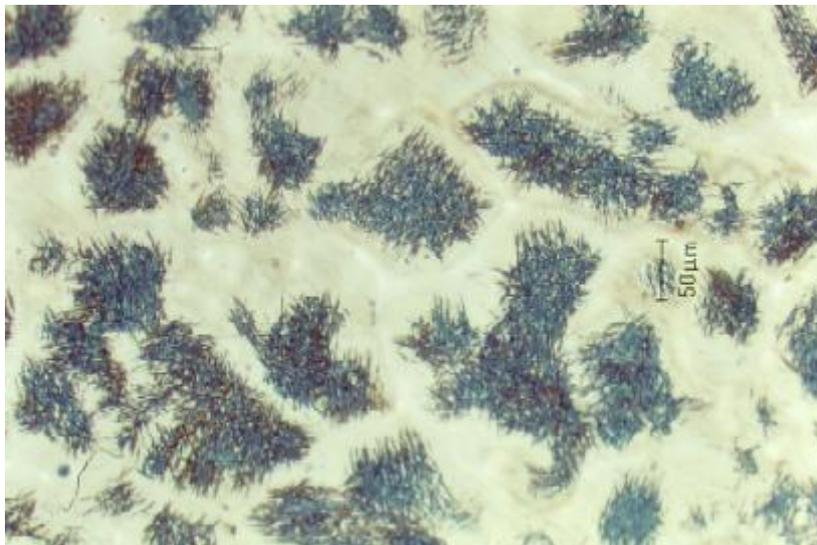
Dureza:

Media: 304 HB

Microestructura:

Martensita dispersa con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado y a la anterior. La suficiente cantidad de austenita como matriz sigue asegurando la tenacidad.

Probeta 2.3. Colada 2 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

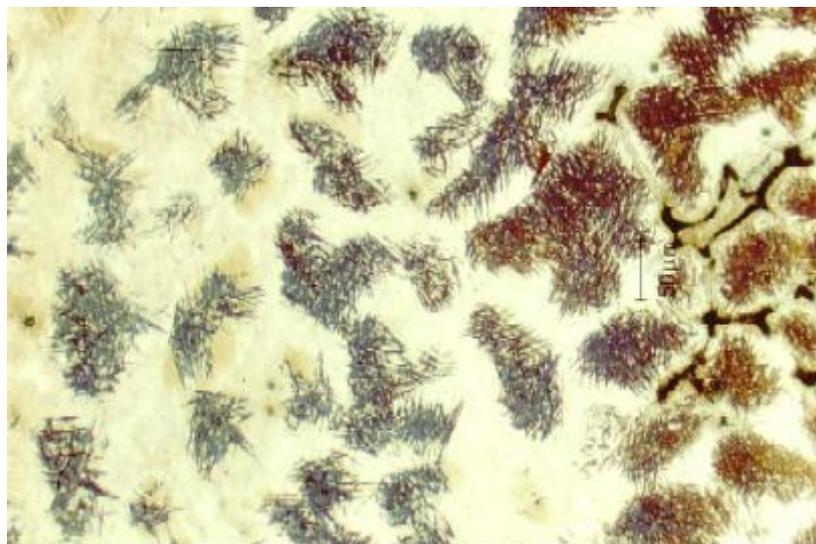
Dureza:

Media: 236 HB

Microestructura:

Martensita revenida dispersa con suficiente cantidad de austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. El aumento de la temperatura finaliza la dureza de baja temperatura.

Probeta 2.4. Colada 2 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

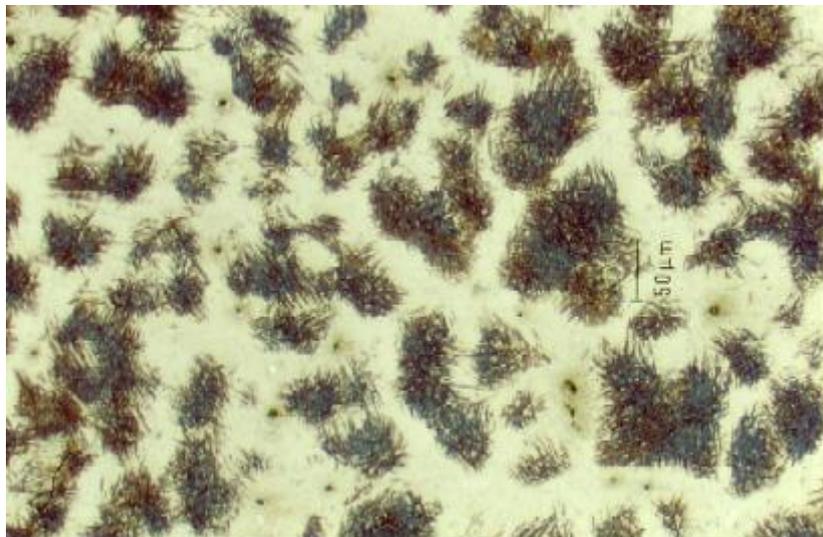
Dureza:

Media: 227 HB

Microestructura:

Martensita revenida dispersa. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre la probeta anterior.

Probeta 2.5. Colada 2 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

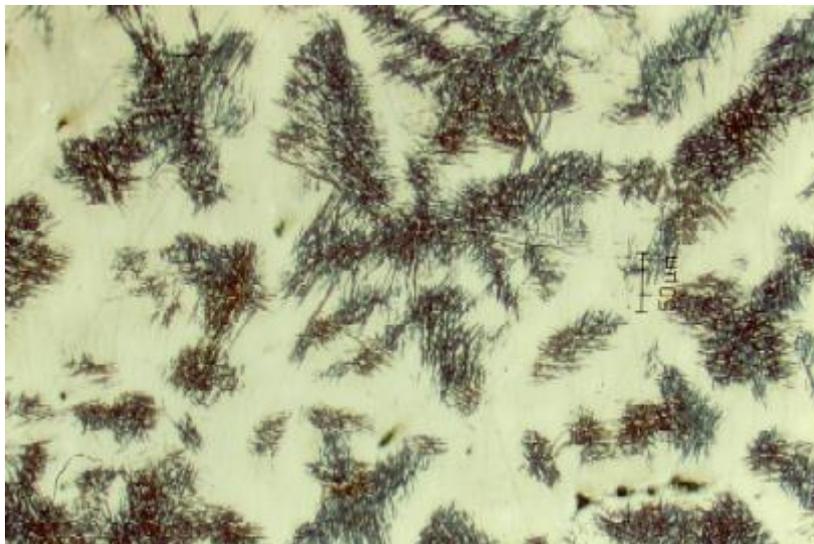
Dureza:

Media: 229 HB

Microestructura:

Martensita revenida dispersa. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre la probeta anterior.

Probeta 2.6. Colada 2 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

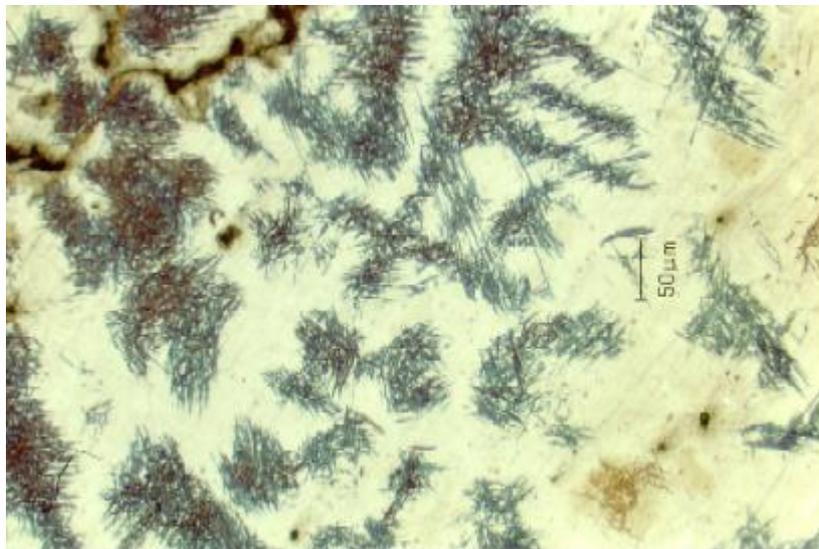
Dureza:

Media: 235 HB

Microestructura:

Martensita revenida dispersa. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre la probeta anterior.

Probeta 2.7. Colada 2 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

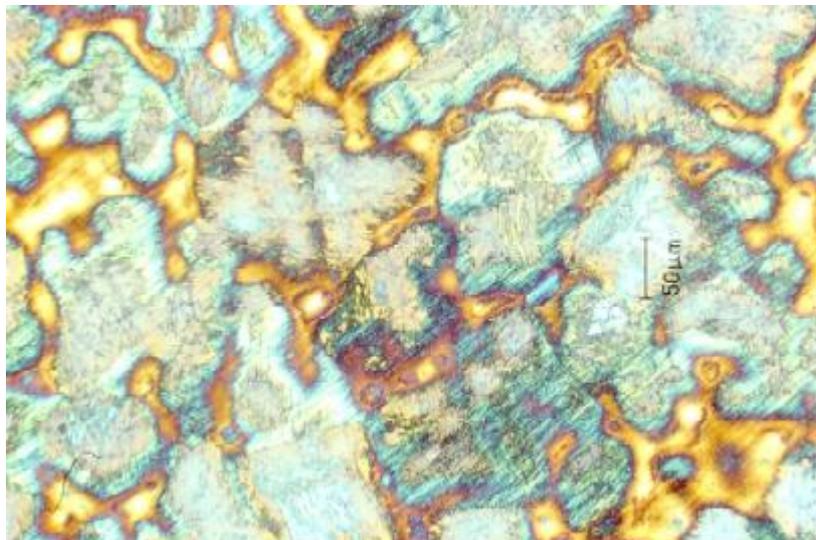
Dureza:

Media: 224 HB

Microestructura:

Martensita revenida dispersa. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 2.8. Colada 2 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

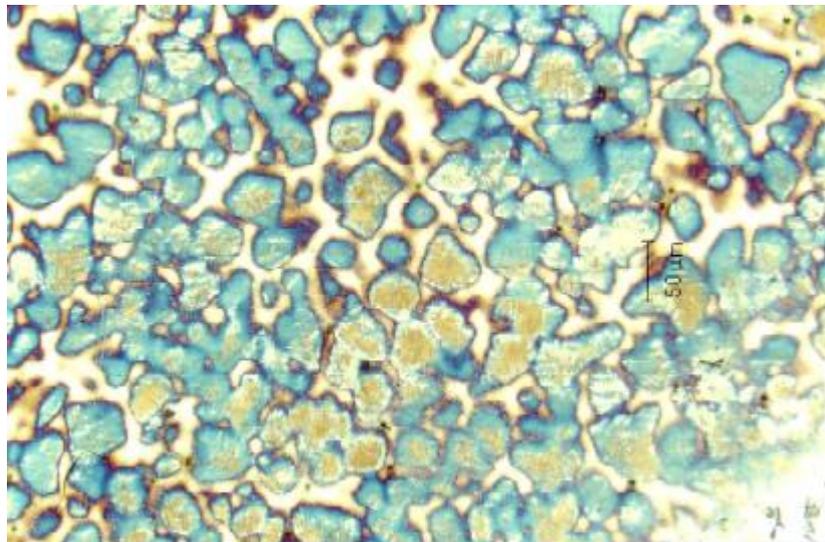
Dureza:

Media: 227 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita retenida. Austenita como matriz en los espacios interdendríticos

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 2.9. Colada 2 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

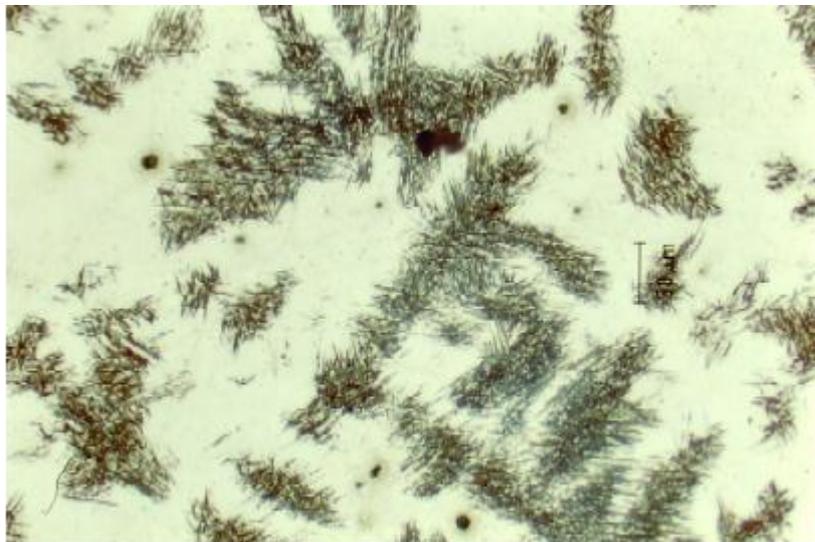
Dureza:

Media: 233 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 2.10. Colada 2 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

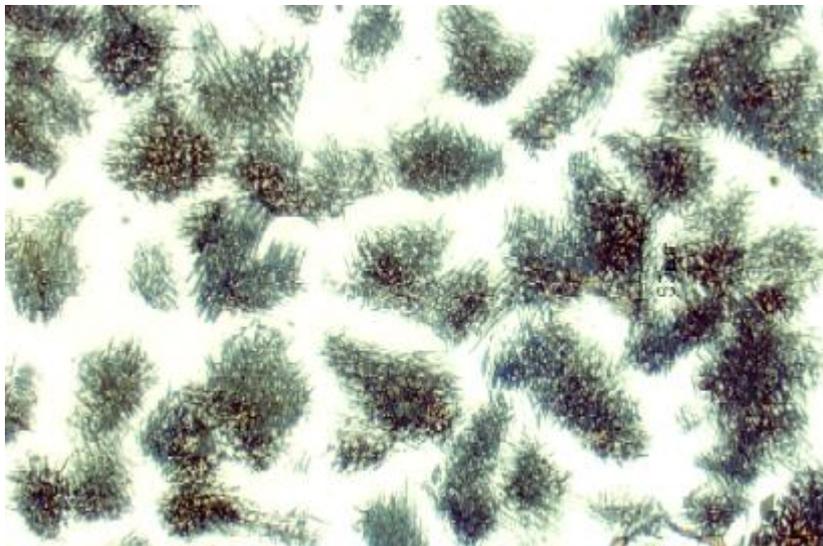
Dureza:

Media: 279 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La aparición de perlita fina hace elevar la dureza del acero. Sin embargo, su carácter disperso y la cantidad suficiente de austenita matriz mantendrán la tenacidad en valores altos.

Probeta 2.11. Colada 2 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

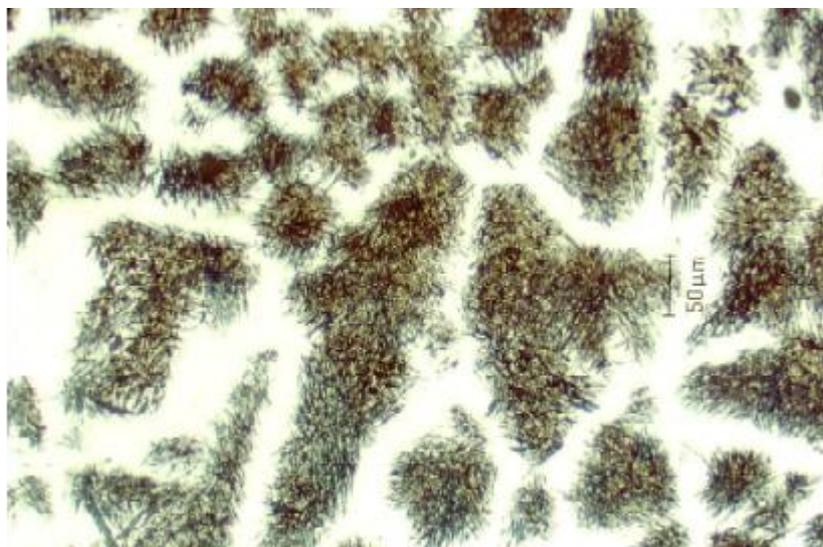
Dureza:

Media: 268 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios importantes respecto a la anterior.

Probeta 2.12. Colada 2 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 292 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La cantidad de perlita ha crecido hasta el límite de eliminar toda la austenita en algunas zonas. Aun así la austenita sigue siendo la matriz de gran parte de la probeta.

Probeta 2.13. Colada 2 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

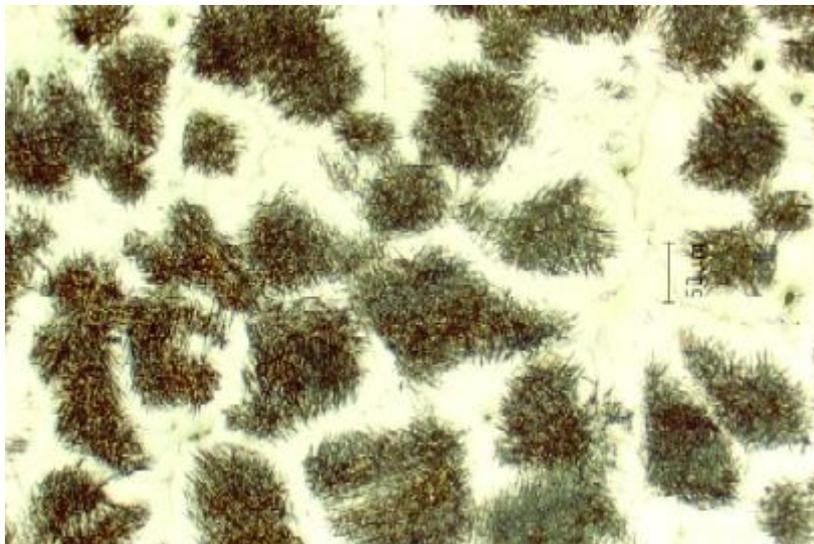
Dureza:

Media: 259 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La cantidad de perlita ha disminuido con respecto al tratamiento anterior, disminuyendo con ello la dureza. La matriz es austenita a lo largo de toda la probeta.

Probeta 2.14. Colada 2 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

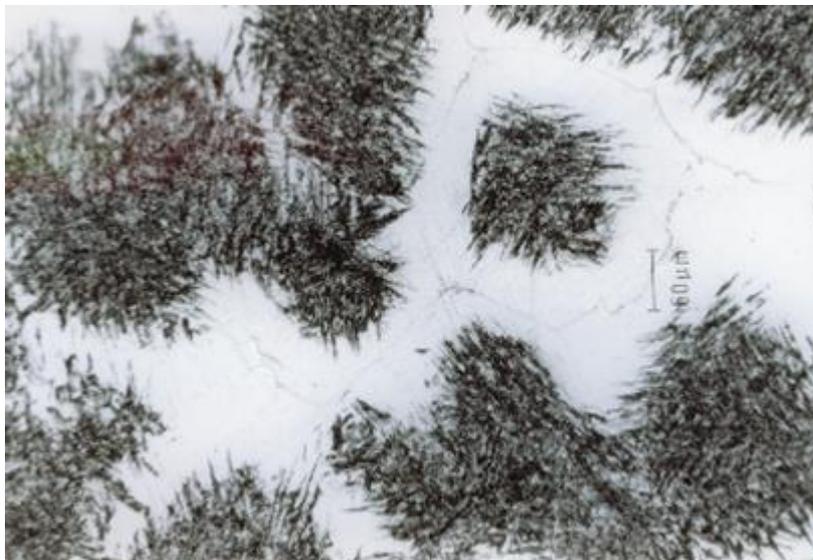
Dureza:

Media: 274 HB

Microestructura:

Martensita revenida y perlita con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables con respecto a la probeta anterior salvo el engrosamiento de las perlitas por la mayor temperatura.

Probeta 2.15. Colada 2 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

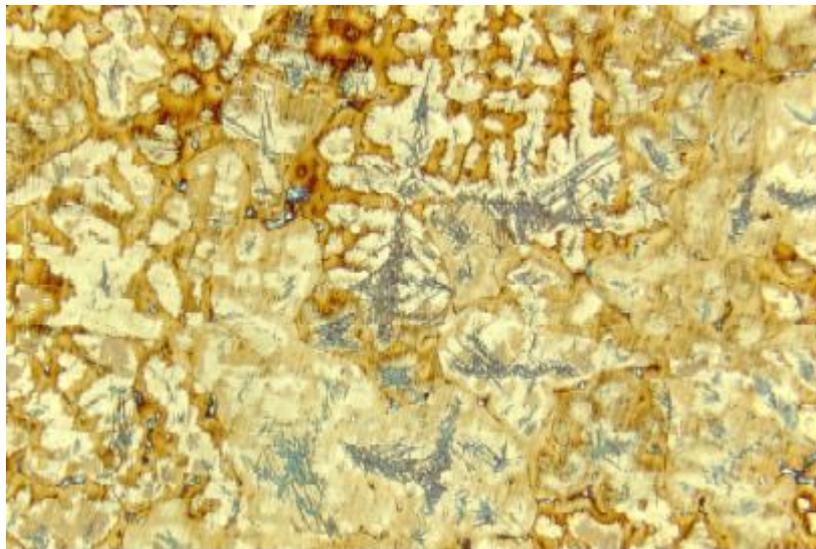
Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y carburos con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La reaustenización parcial de las zonas martensíticas del hipertemple hacen que reaparezca martensita sin revenir. Nuevamente la temperatura elevada hace crecer el tamaño y la cantidad de carburos.

Probeta 2.16. Colada 2 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

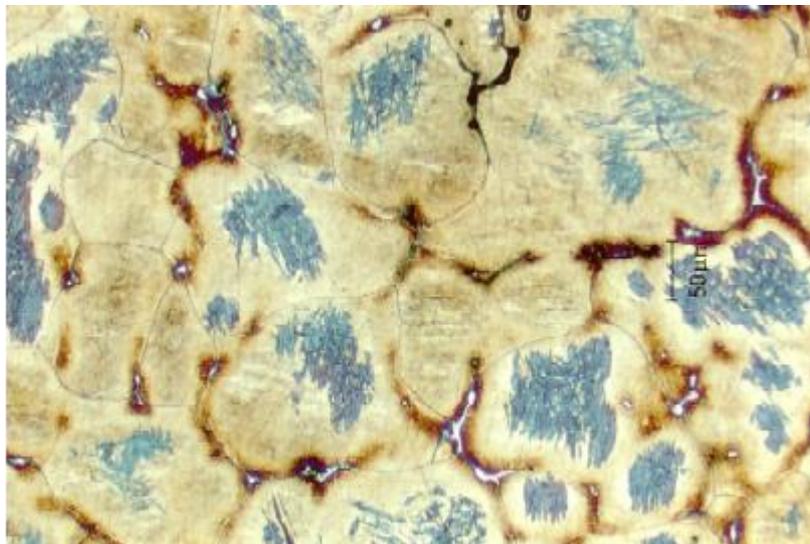
Dureza:

Media: 256 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y carburos con austenita como matriz.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Mayor cantidad de carburos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 2.17. Colada 2 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,5	2	1,5	2

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

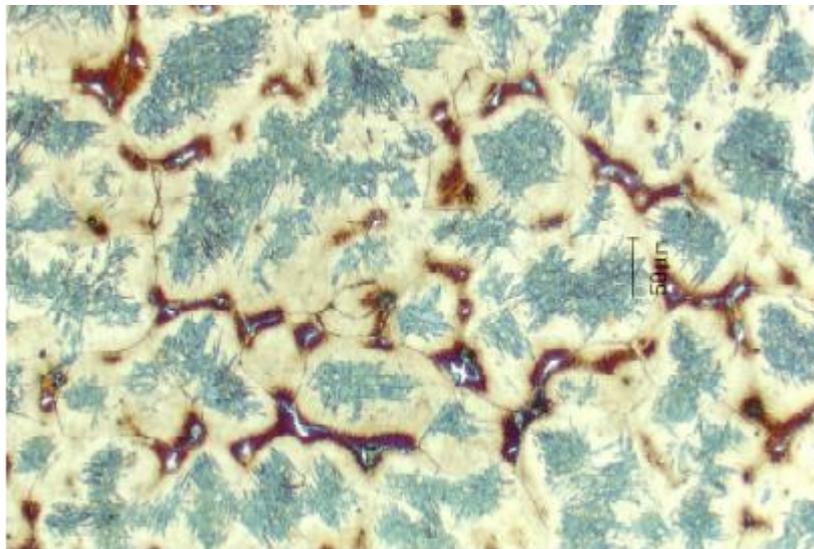
Dureza:

Media: 292 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir con austenita como matriz y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Una cantidad algo mayor de martensita y carburos aumenta la dureza del acero con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 3.1. Colada 3 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

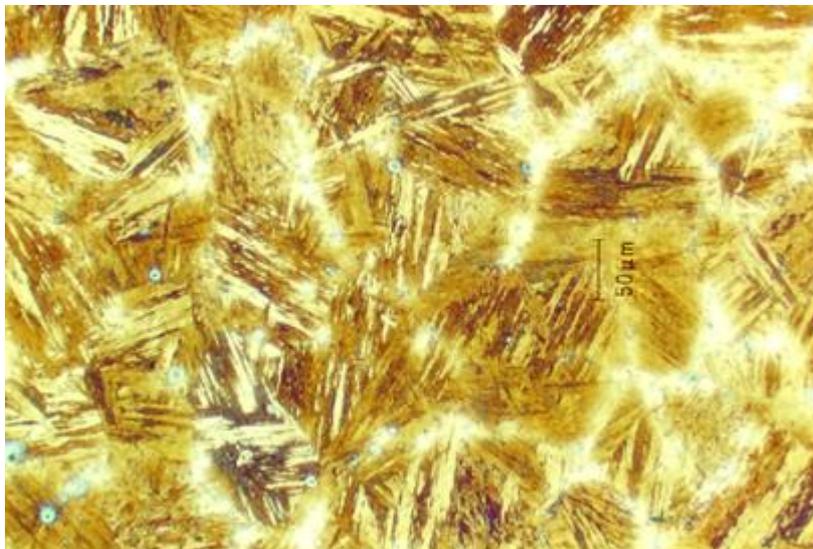
Dureza:

Media: 317 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La microestructura consta de grandes paquetes de martensita con algo de austenita retenida. La dureza en este estado es alta pero la resiliencia ha de ser muy baja por la escasa cantidad de austenita.

Probeta 3.2. Colada 3 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

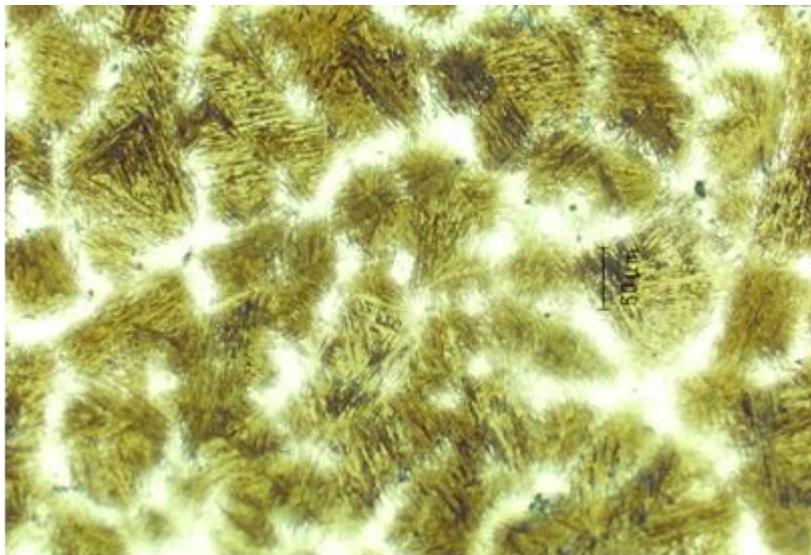
Dureza:

Media: 303 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La microestructura es similar a la de la probeta anterior pero con un revenido más alto de la martensita.

Probeta 3.3. Colada 3 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

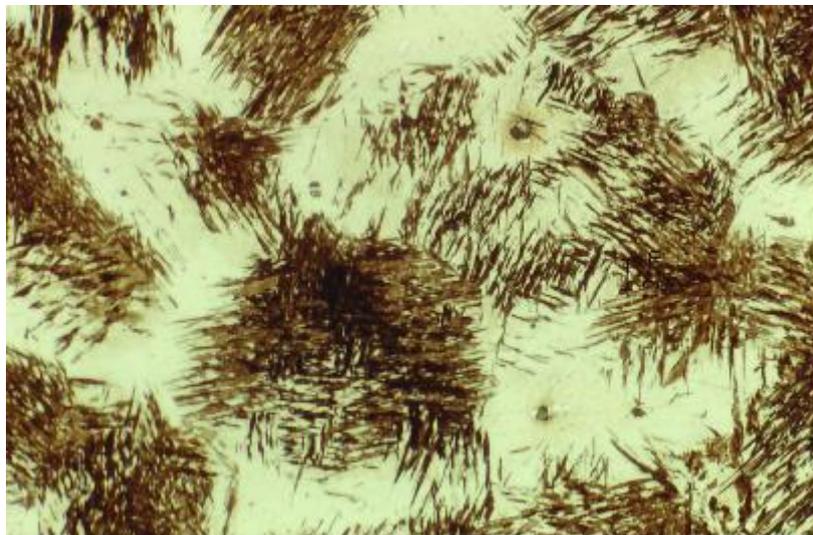
Dureza:

Media: 234 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. El revenido de la martensita a más temperatura ablanda el acero.

Probeta 3.4. Colada 3 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

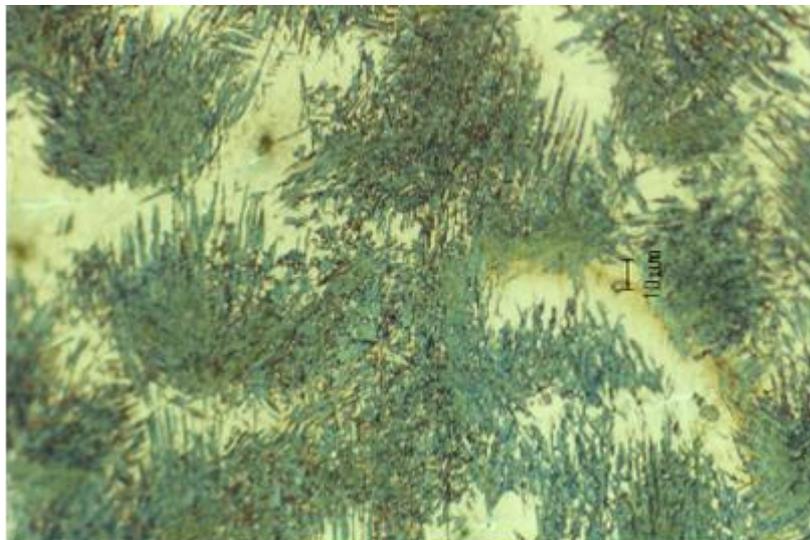
Dureza:

Media: 231 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 3.5. Colada 3 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

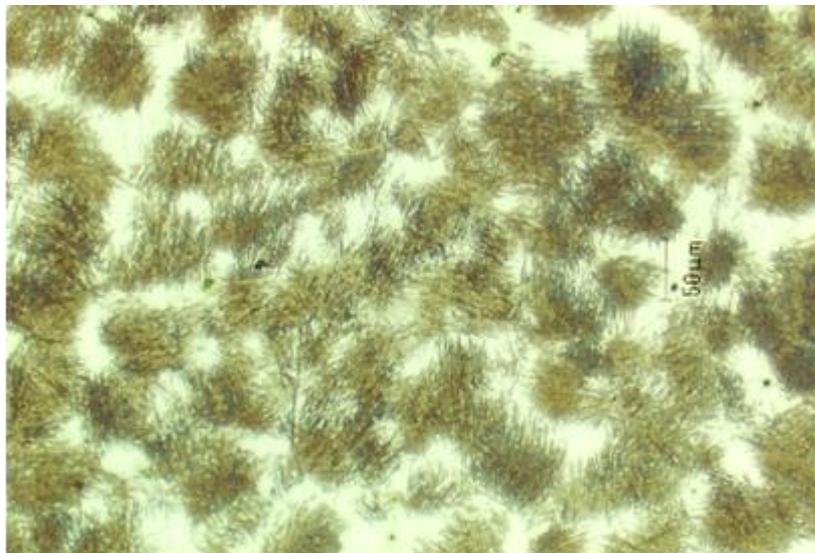
Dureza:

Media: 229 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Muy similar al estado anterior.

Probeta 3.6. Colada 3 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

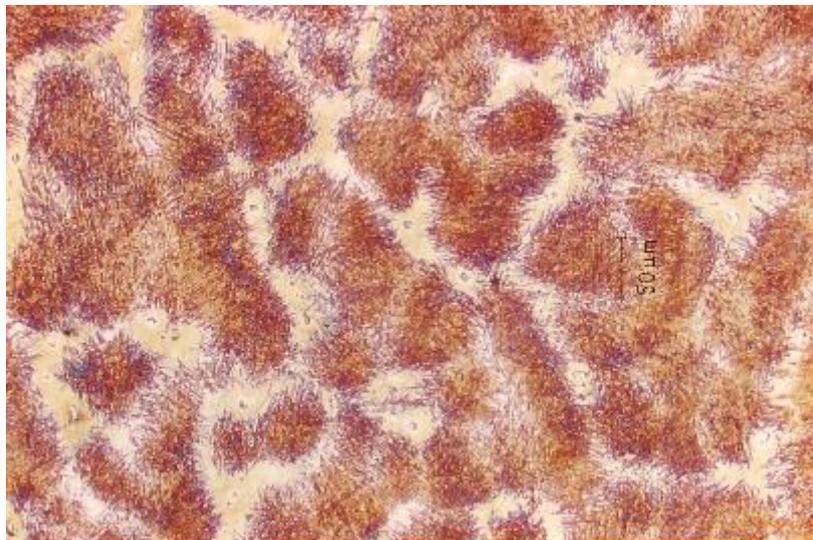
Dureza:

Media: 265 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 3.7. Colada 3 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

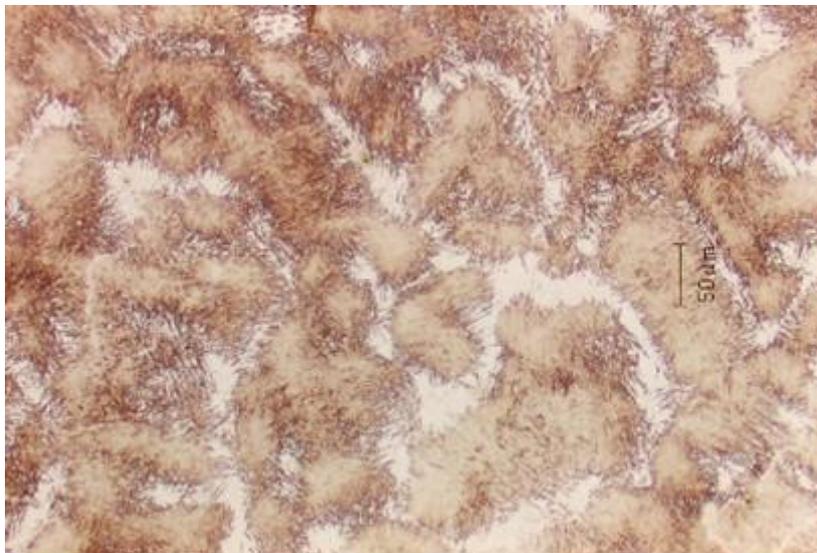
Dureza:

Media: 230 HB

Microestructura:

Martensita revenida media con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. El revenido más alto hace caer la dureza.

Probeta 3.8. Colada 3 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

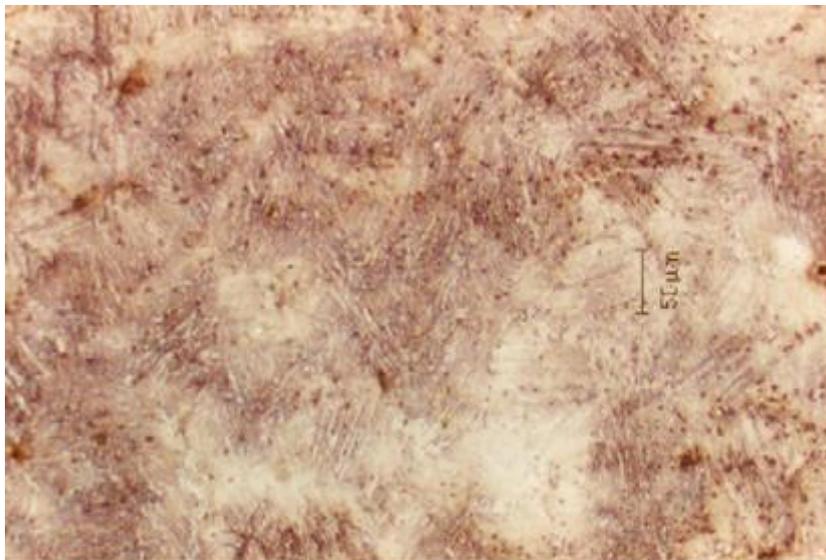
Dureza:

Media: 233 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 3.9. Colada 3 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

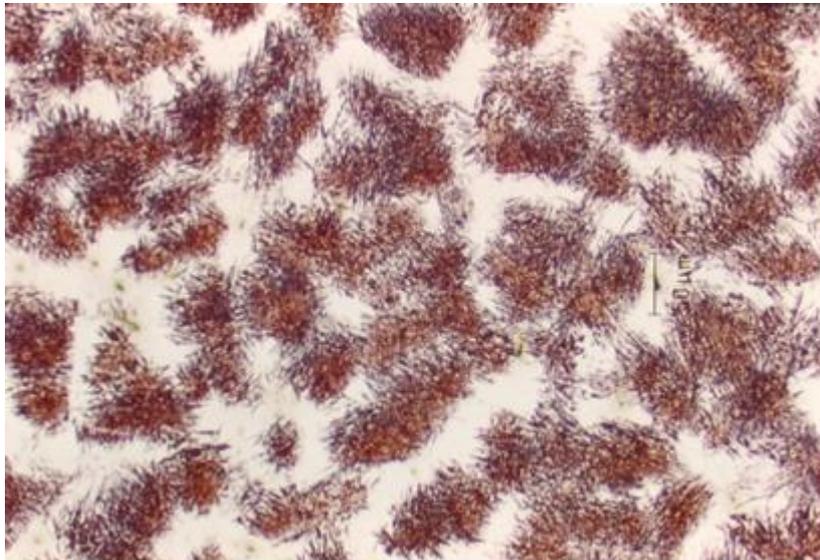
Dureza:

Media: 233 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al tratamiento anterior.

Probeta 3.10. Colada 3 Tratamiento a 550°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 282 HB

Microestructura:

Martensita revenida media con perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Comienza la aparición de perlitas elevando la dureza.

Probeta 3.11. Colada 3 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

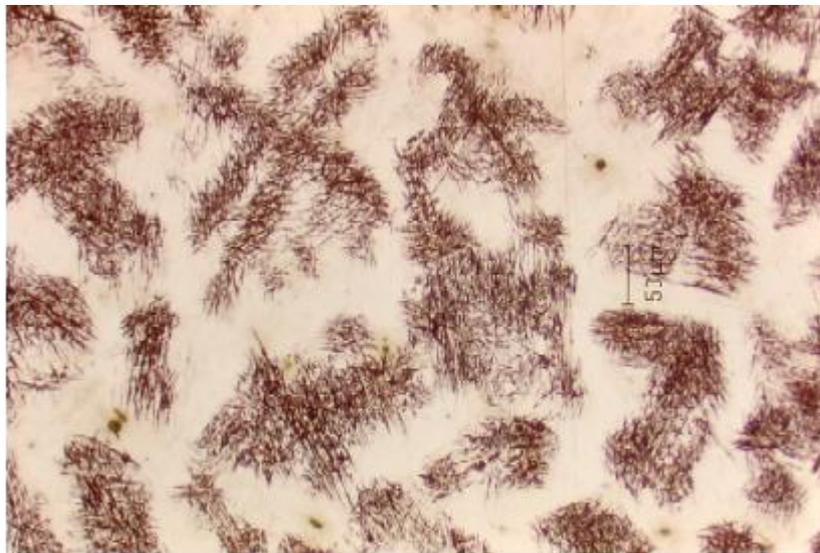
Dureza:

Media: 328 HB

Microestructura:

Martensita revenida alta con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La aparición de perlita aumenta y con ella la dureza.

Probeta 3.12. Colada 3 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

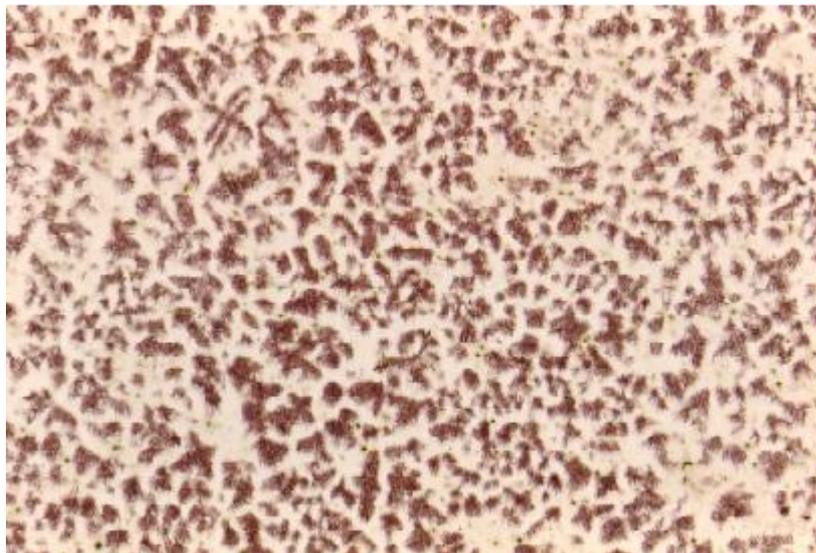
Dureza:

Media: 429 HB

Microestructura:

Martensita revenida alta con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. La aparición de una mayor cantidad de perlita eleva aún más la dureza.

Probeta 3.13. Colada 3 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

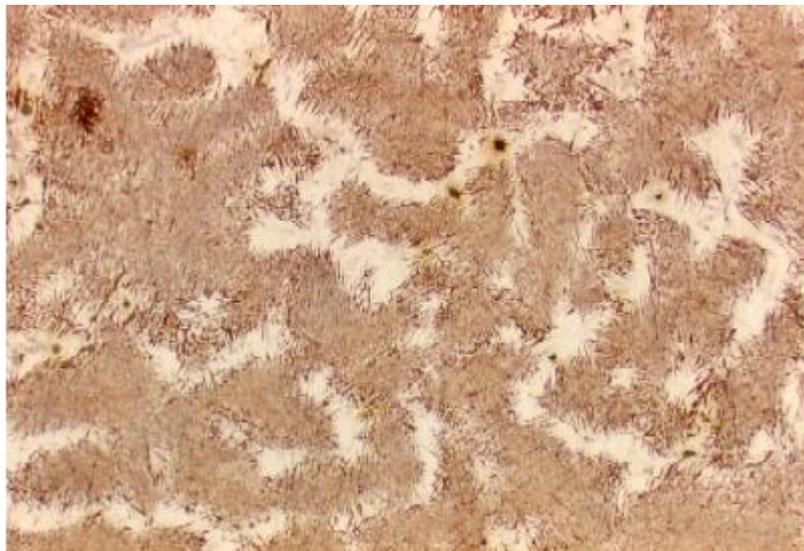
Dureza:

Media: 417 HB

Microestructura:

Martensita revenida alta con bainita superior, constituyentes laminares y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 3.14. Colada 3 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

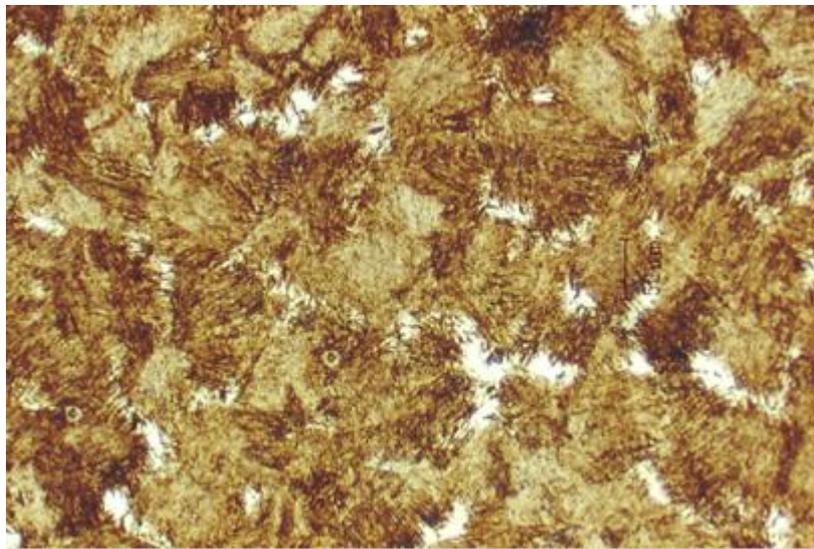
Dureza:

Media: 362 HB

Microestructura:

Martensita revenida alta, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La cantidad de austenita es ya escasa pero la dureza baja algo por el aumento del espaciado interlaminar.

Probeta 3.15. Colada 3 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

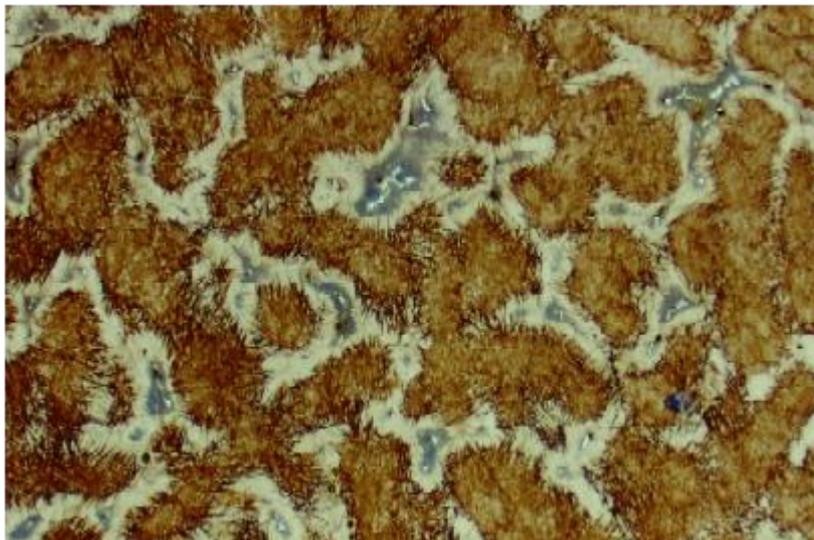
Dureza:

Media: 313 HB

Microestructura:

Martensita revenida alta con perlita y austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La alta temperatura hace crecer los carburos en la austenita retenida y otras zonas han reaustenizado.

Probeta 3.16. Colada 3 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

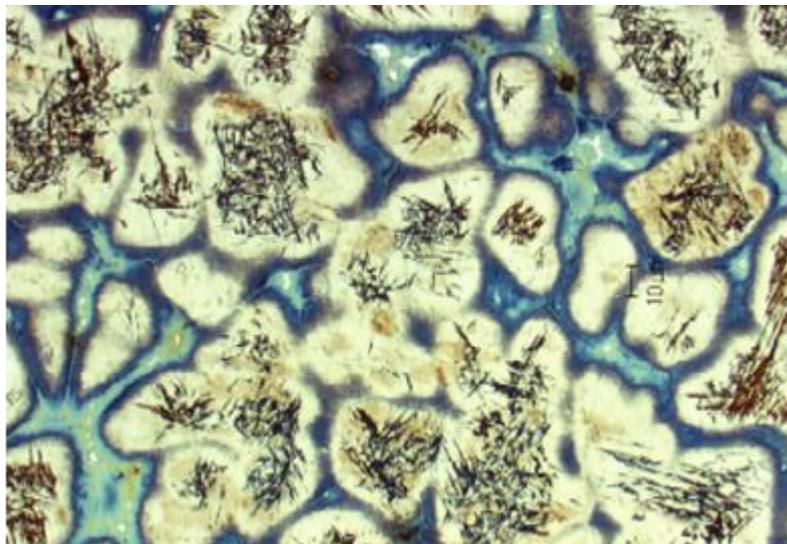
Dureza:

Media: 297 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. El acero se ha reaustenizado y ha templado en el enfriamiento. La microestructura es semejante al del estado hipertemplado pero la heterogeneidad menor está atenuada y hay más carburos de mayor tamaño.

Probeta 3.17. Colada 3 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,3	6	0,65	3	1,1	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

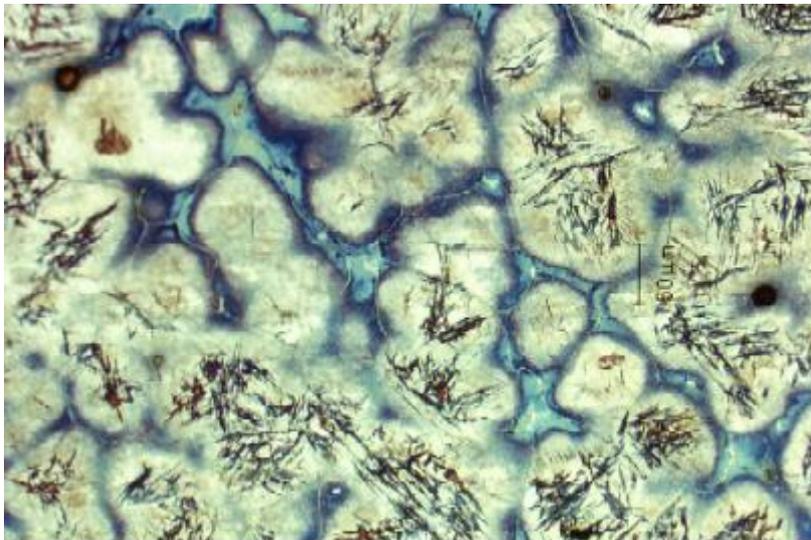
Dureza:

Media: 299 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo la menor cantidad de carburos.

Probeta 4.1. Colada 4 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

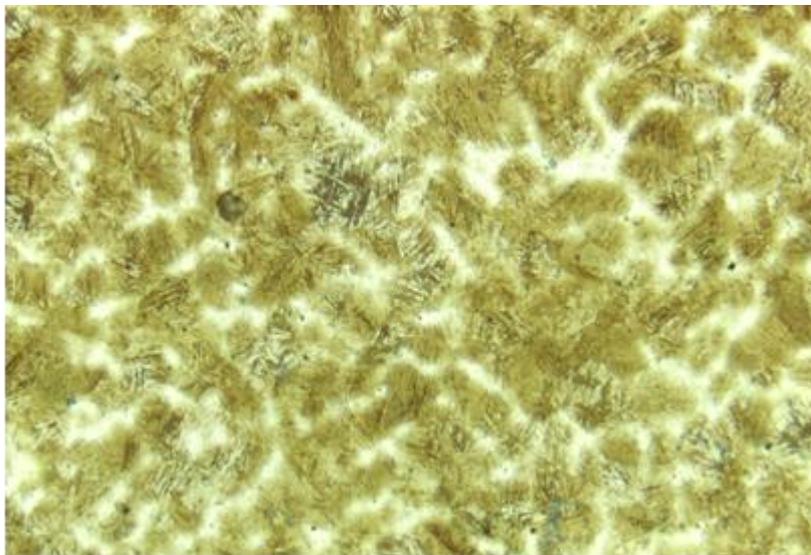
Dureza:

Media: 510 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado (el bajo contenido en manganeso y carburígenos hace que el hipertemplado contenga una gran cantidad de martensita). La microestructura consta de grandes paquetes de martensita con algo de austenita retenida. Alta dureza pero la resiliencia ha de ser muy baja.

Probeta 4.2. Colada 4 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

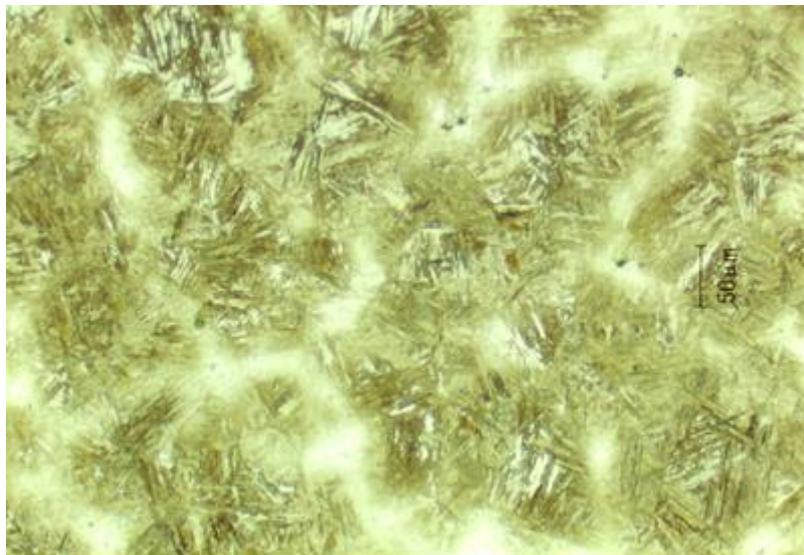
Dureza:

Media: 426 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. El revenido comienza a ablandar la martensita.

Probeta 4.3. Colada 4 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

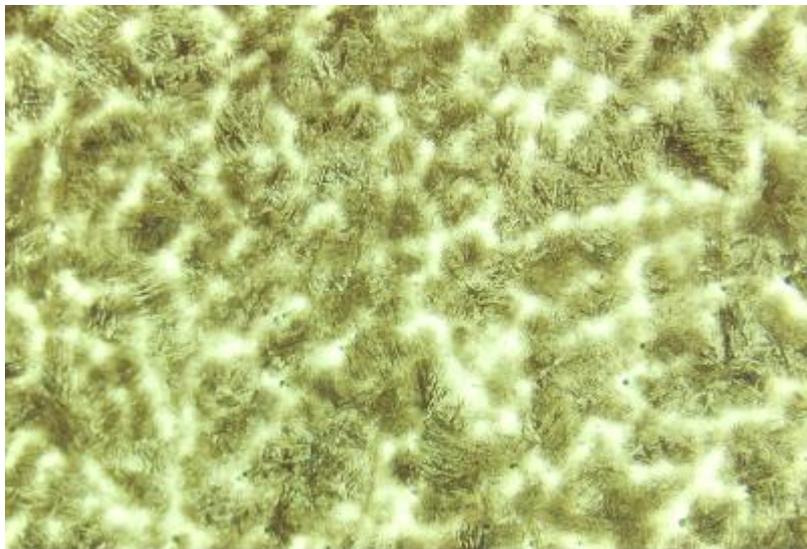
Dureza:

Media: 381 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. El revenido continúa ablandando la martensita.

Probeta 4.4. Colada 4 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

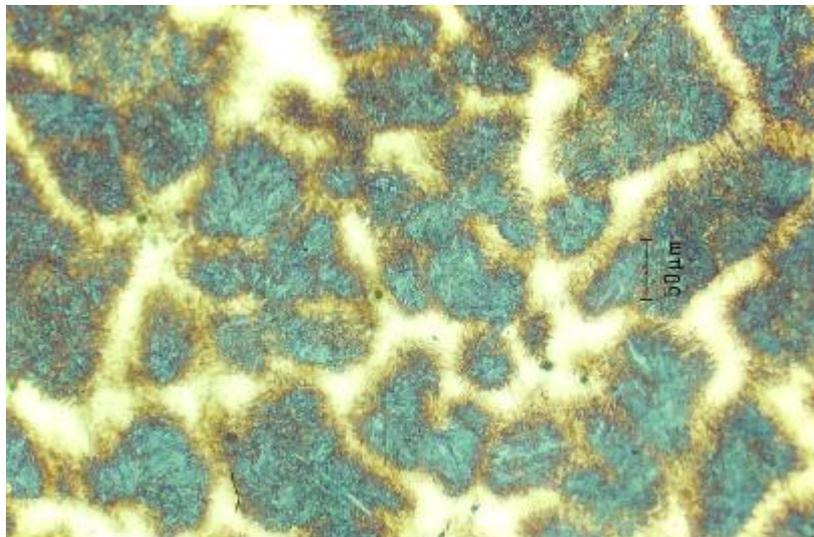
Dureza:

Media: 356 HB

Microestructura:

Martensita revenida media con bainitas inferiores y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Aparece algo de bainita por la transformación de parte de la austenita retenida. La martensita continúa ablandando.

Probeta 4.5. Colada 4 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

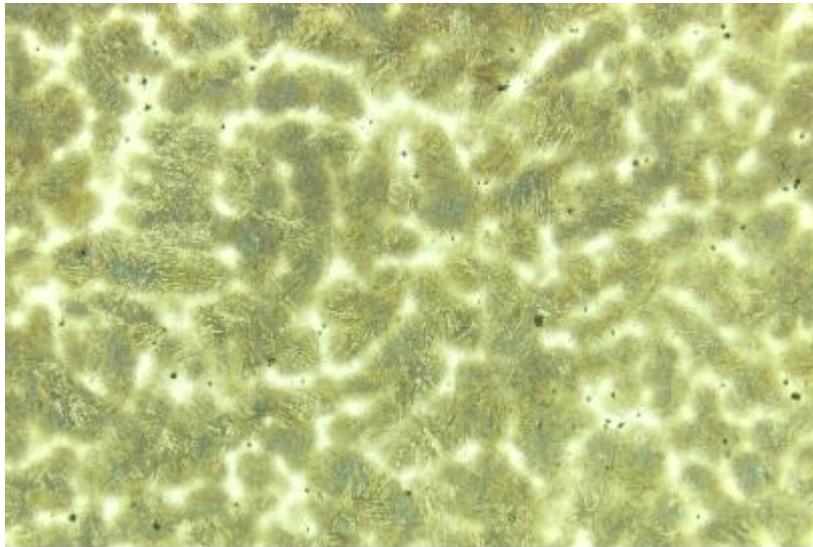
Dureza:

Media: 363 HB

Microestructura:

Martensita revenida media con bainitas inferiores y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 4.6. Colada 4 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

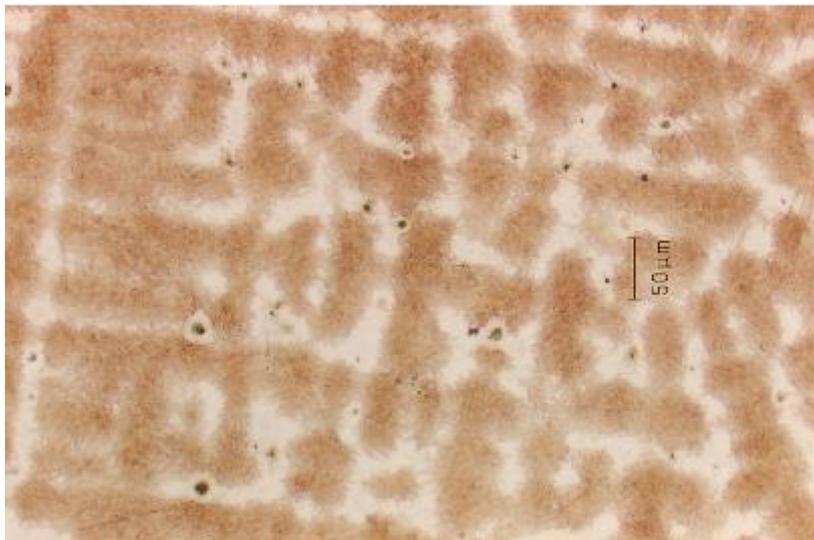
Dureza:

Media: 373 HB

Microestructura:

Martensita revenida con bainitas y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 4.7. Colada 4 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

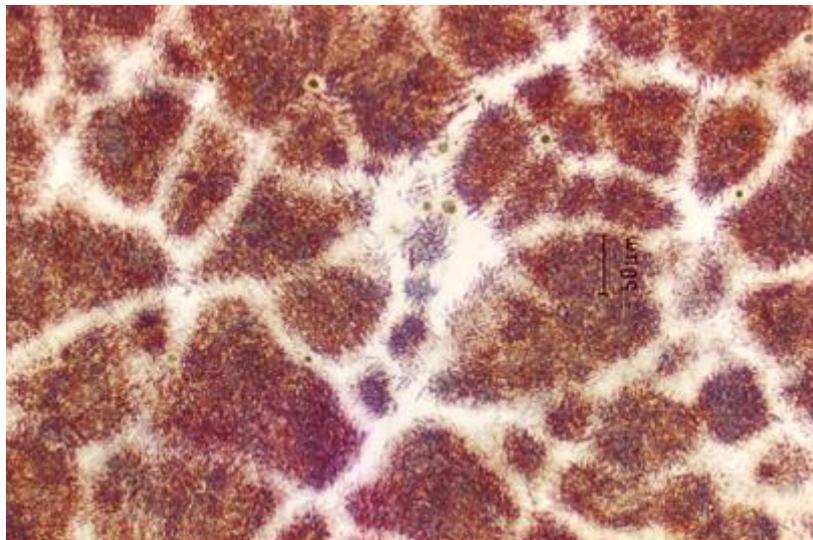
Dureza:

Media: 376 HB

Microestructura:

Martensita revenida con bainitas superiores y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Comienza la aparición de bainitas superiores.

Probeta 4.8. Colada 4 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

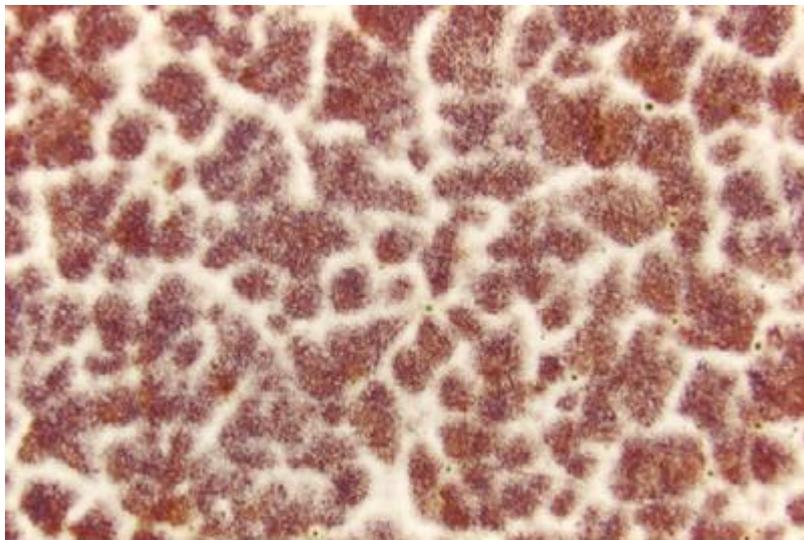
Dureza:

Media: 365 HB

Microestructura:

Martensita revenida con bainitas superiores y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 4.9. Colada 4 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

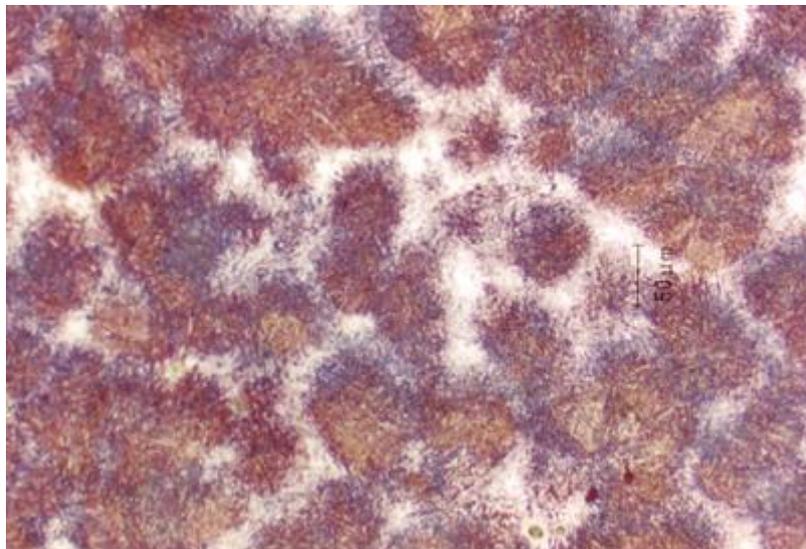
Dureza:

Media: 378 HB

Microestructura:

Martensita revenida con bainitas superiores y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 4.10. Colada 4 Tratamiento a 550°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

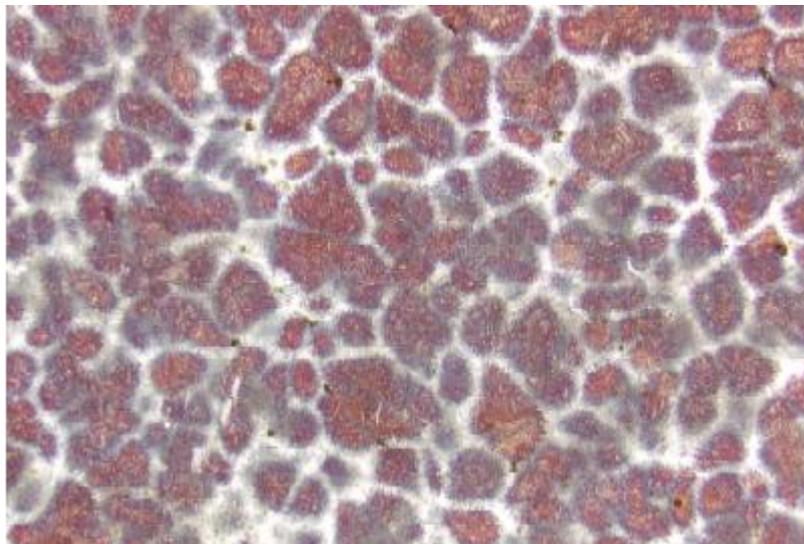
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 428 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlitas y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. La gran cantidad de perlita fina endurece el acero.

Probeta 4.11. Colada 4 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

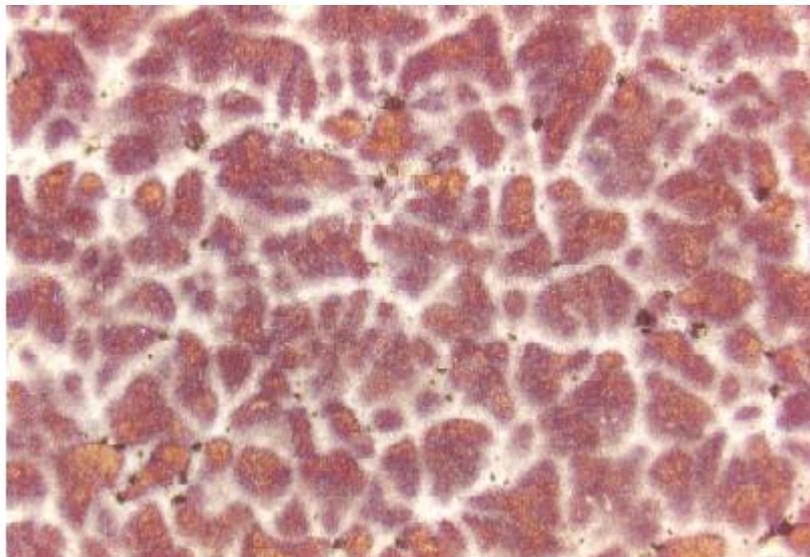
Dureza:

Media: 502 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. Sigue aumentando la cantidad de perlita y la dureza del acero.

Probeta 4.12. Colada 4 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

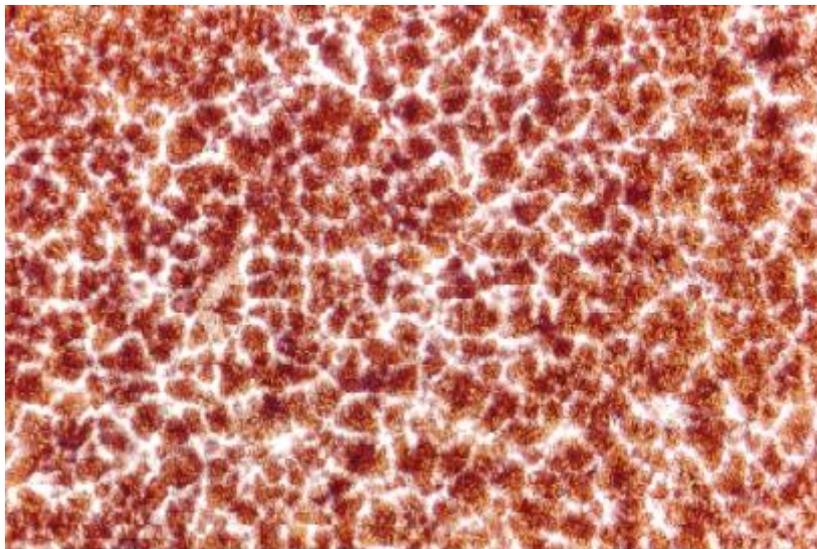
Dureza:

Media: 420 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. La perlita más gruesa hace perder dureza.

Probeta 4.13. Colada 4 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

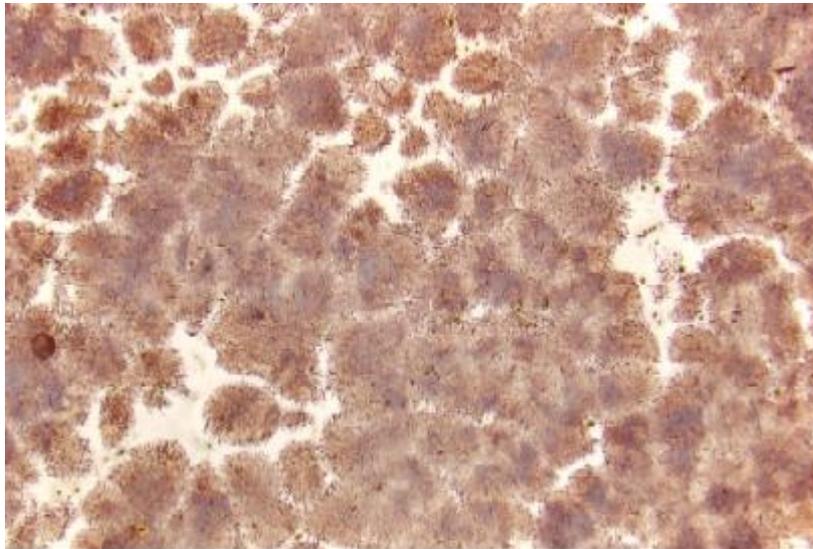
Dureza:

Media: 414 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. La transformación perlítica es ya generalizada.

Probeta 4.14. Colada 4 Tratamiento a 750°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

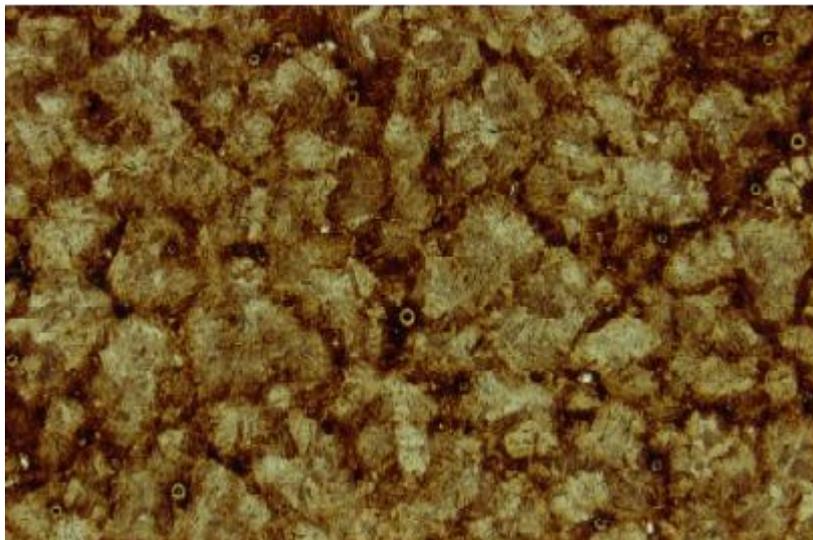
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 373 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza menor a la del estado hipertemplado. La transformación perlítica ha acabado con toda la austenita retenida y la martensita está completamente revenida.

Probeta 4.15. Colada 4 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

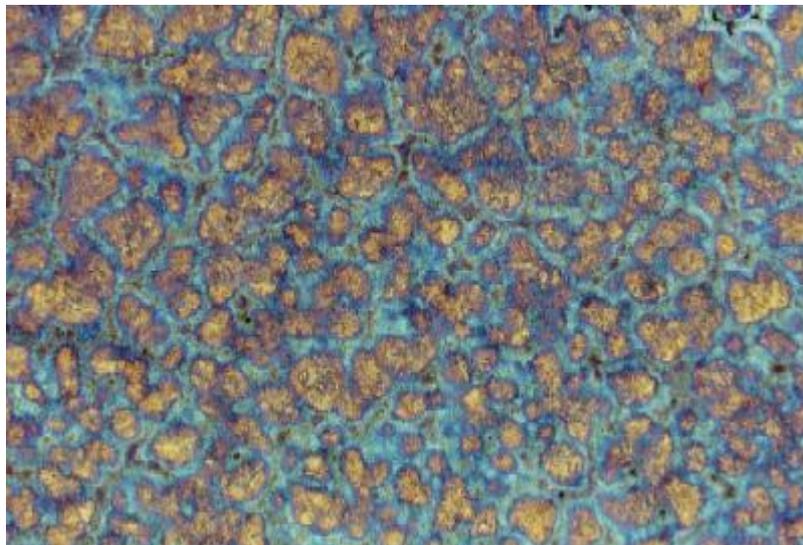
Dureza:

Media: 536 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir con austenita retenida, islas de perlita y carburos dispersos en la austenita.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. La transformación austenítica a la temperatura de tratamiento ha propiciado el temple durante el enfriamiento disparando la dureza. Las zonas no austenizadas continúan siendo perlíticas

Probeta 4.16. Colada 4 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

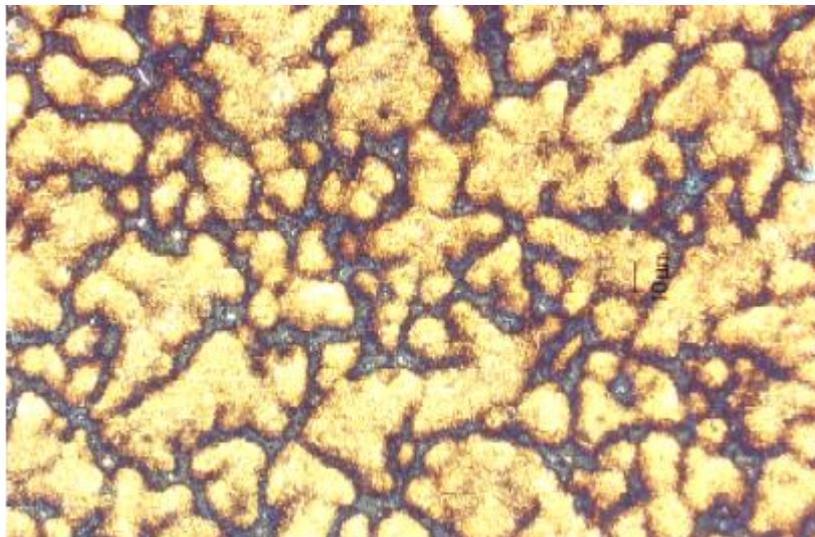
Dureza:

Media: 513 HB

Microestructura:

Martensita con austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos respecto a la probeta anterior salvo la desaparición completa de la perlita.

Probeta 4.17. Colada 4 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1	5	0,5	3	1,5	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

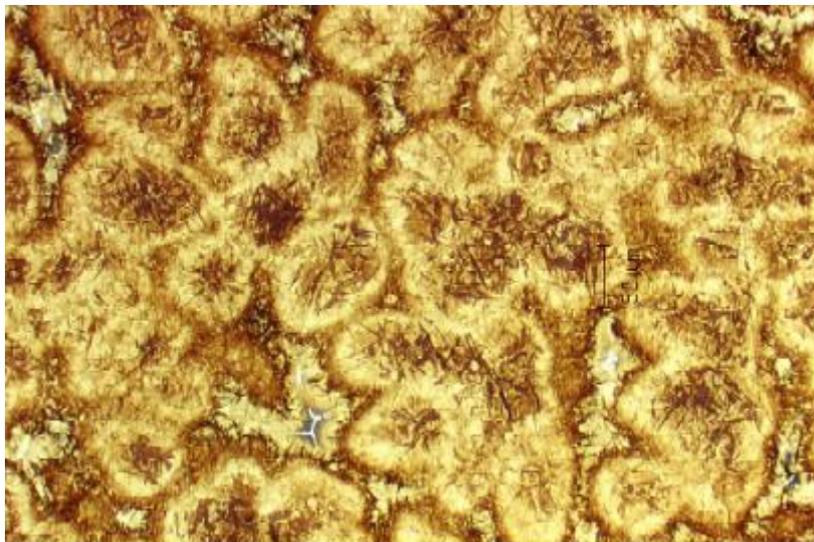
Dureza:

Media: 490 HB

Microestructura:

Martensita con austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.1. Colada 5 Tratamiento a 100°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 242 HB

Microestructura:

Martensita con austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza ligeramente inferior al estado hipertemplado. La martensita vuelve a aparecer en los troncos dendríticos.

Probeta 5.2. Colada 5 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

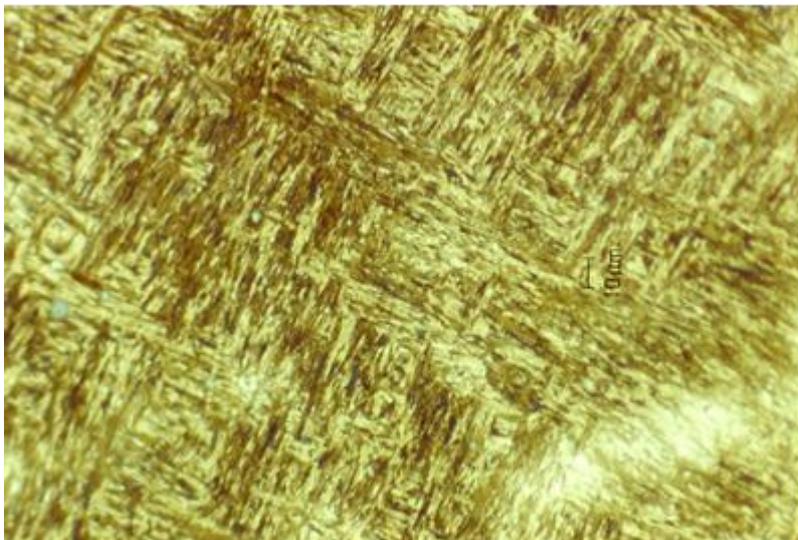
Dureza:

Media: 313 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. El ligero endurecimiento a esta temperatura puede ser explicado, como en los casos anteriores, por la precipitación de carburos submicroscópicos en la austenita.

Probeta 5.3. Colada 5 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

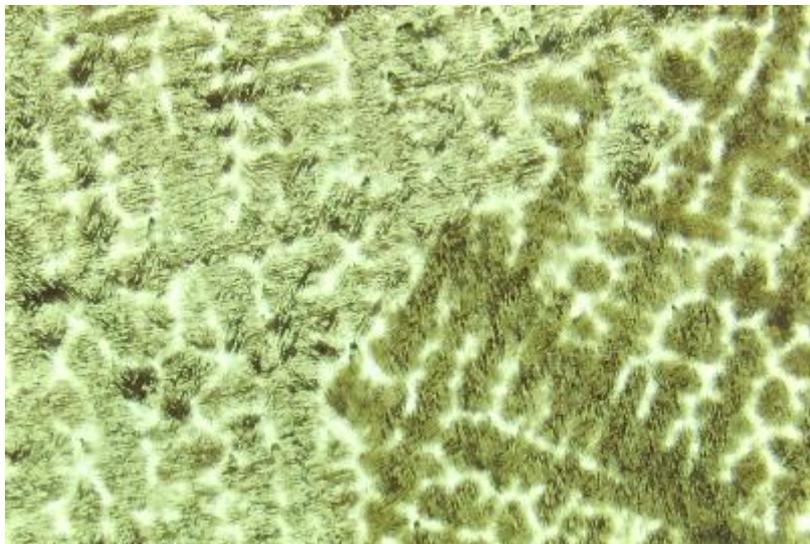
Dureza:

Media: 228 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. La desaparición del endurecimiento anterior es coherente con la anomalía de los revenidos a estas temperaturas descrito en la probeta anterior.

Probeta 5.4. Colada 5 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 235 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.5. Colada 5 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

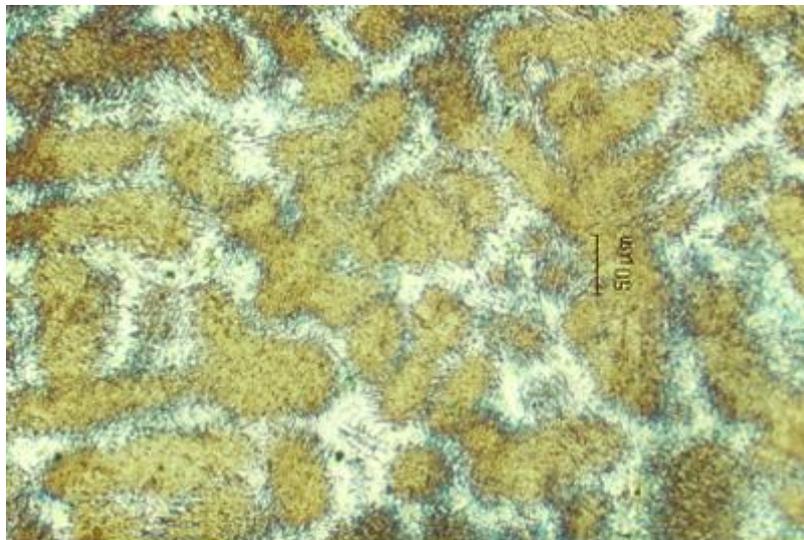
Dureza:

Media: 227 HB

Microestructura:

Martensita revenida en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.6. Colada 5 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

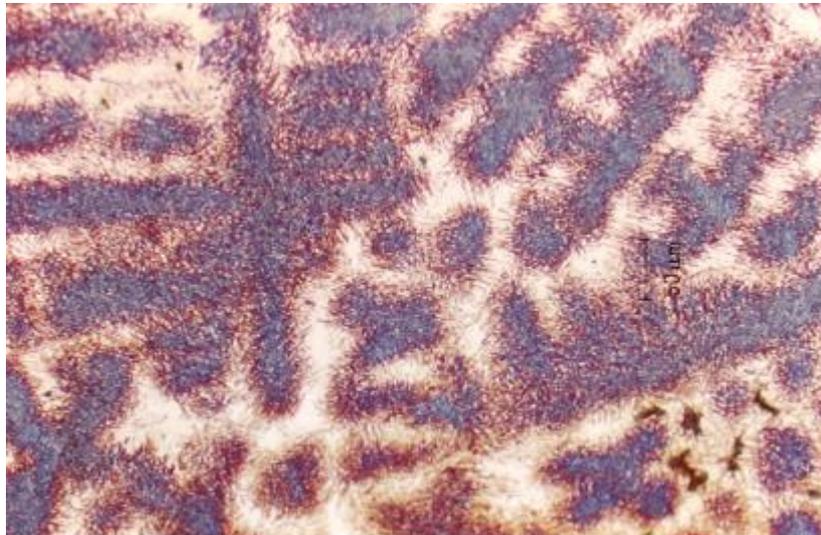
Dureza:

Media: 251 HB

Microestructura:

Martensita revenida en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.7. Colada 5 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

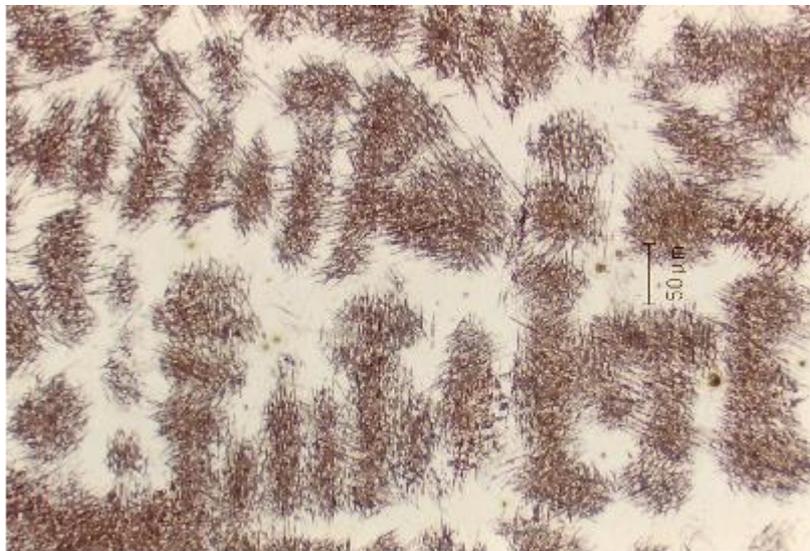
Dureza:

Media: 244 HB

Microestructura:

Martensita revenida en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.8. Colada 5 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

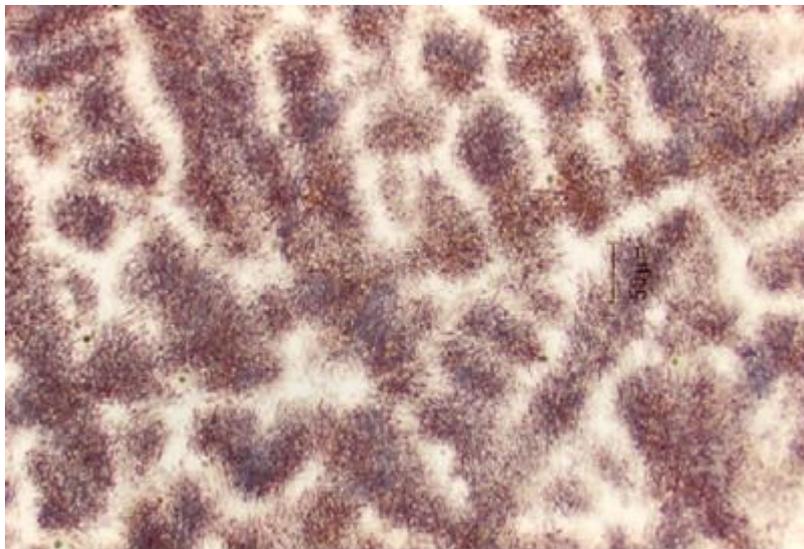
Dureza:

Media: 243 HB

Microestructura:

Martensita revenida en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. El revenido superior en cada tratamiento va ablandando ligeramente la probeta.

Probeta 5.9. Colada 5 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

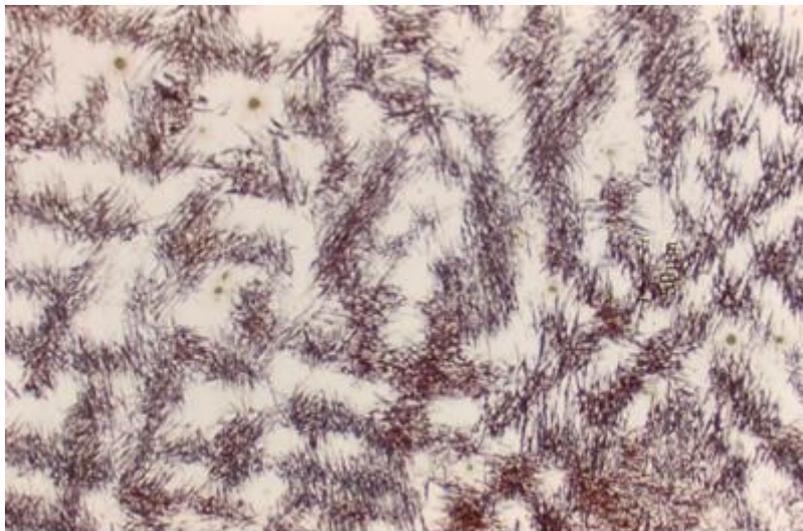
Dureza:

Media: 234 HB

Microestructura:

Martensita revenida en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 5.10. Colada 5 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

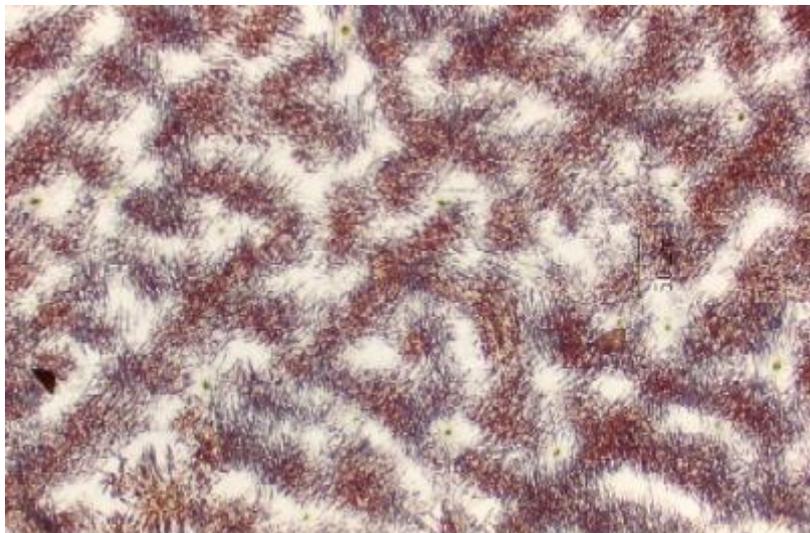
Dureza:

Media: 297 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir en matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Comienza la aparición de martensita nueva debida al acondicionamiento de la austenita durante la permanencia a alta temperatura.

Probeta 5.11. Colada 5 Tratamiento a 600°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

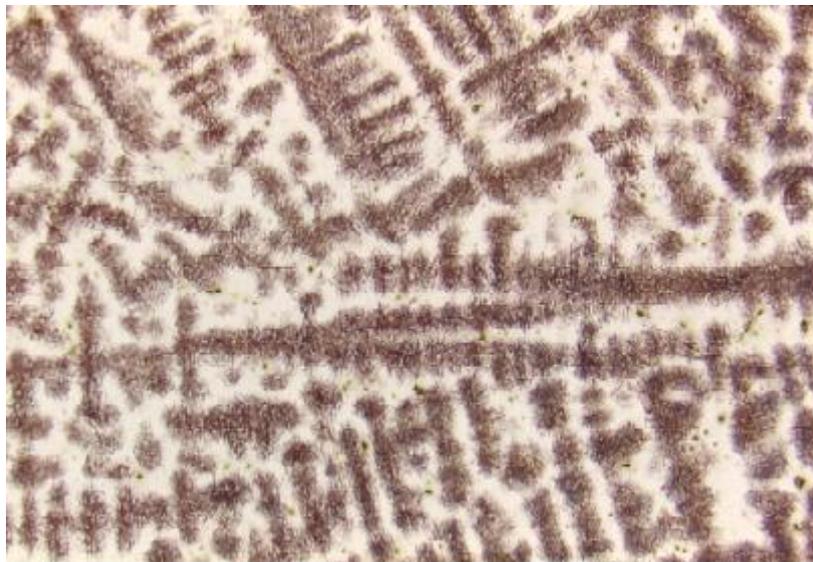
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 381 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir en matriz de austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. El efecto anterior se acentúa endureciendo aún más el acero.

Probeta 5.12. Colada 5 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 565 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. La dureza alcanza valores máximos al templar casi toda la austenita.

Probeta 5.13. Colada 5 Tratamiento a 700°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

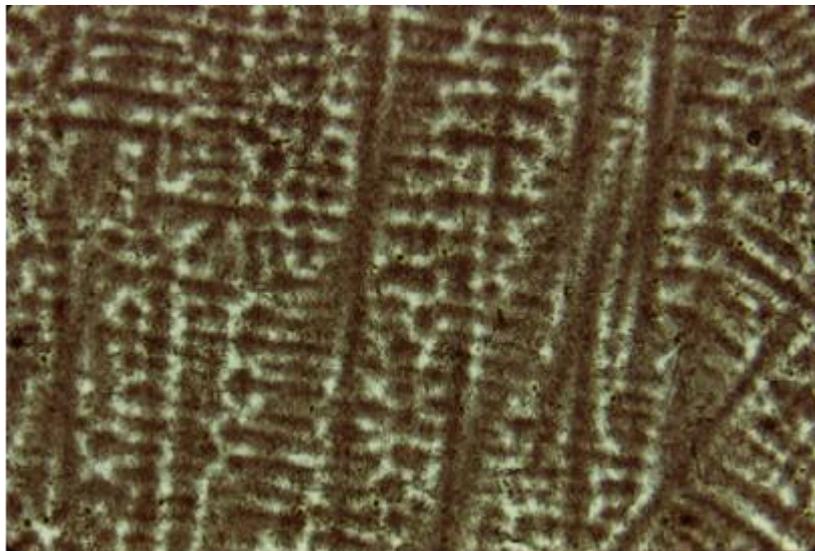
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 484 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir con austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al estado anterior.

Probeta 5.14. Colada 5 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

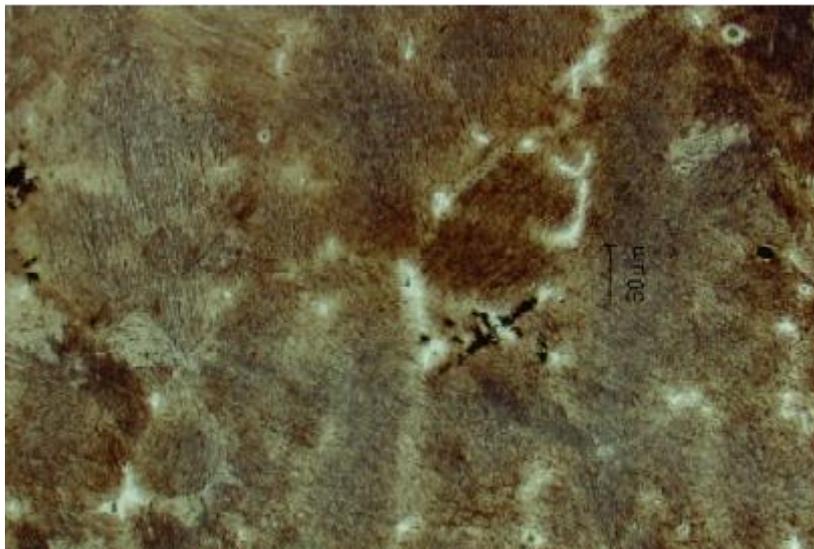
Dureza:

Media: 587 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir con austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. Comienzan a aparecer algunos carburos de mayor tamaño.

Probeta 5.15. Colada 5 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

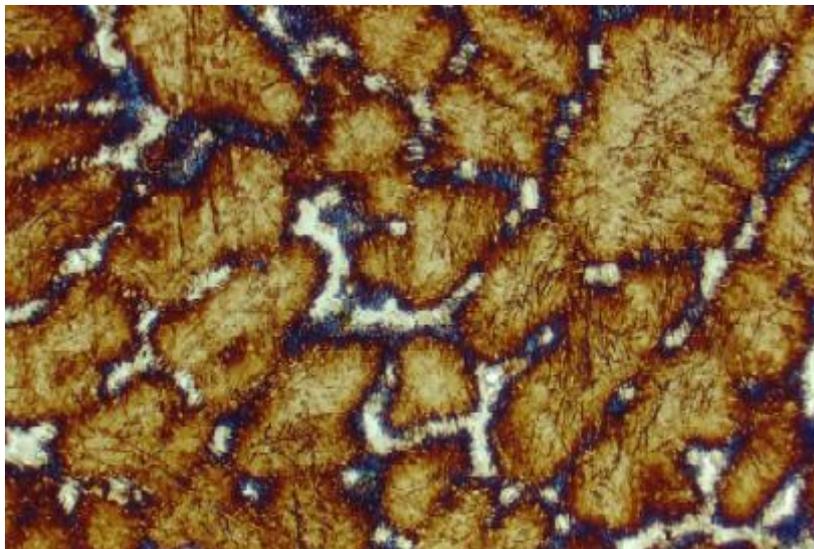
Dureza:

Media: 584 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir con austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al estado anterior salvo la reaustenización parcial de algunas zonas.

Probeta 5.16. Colada 5 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

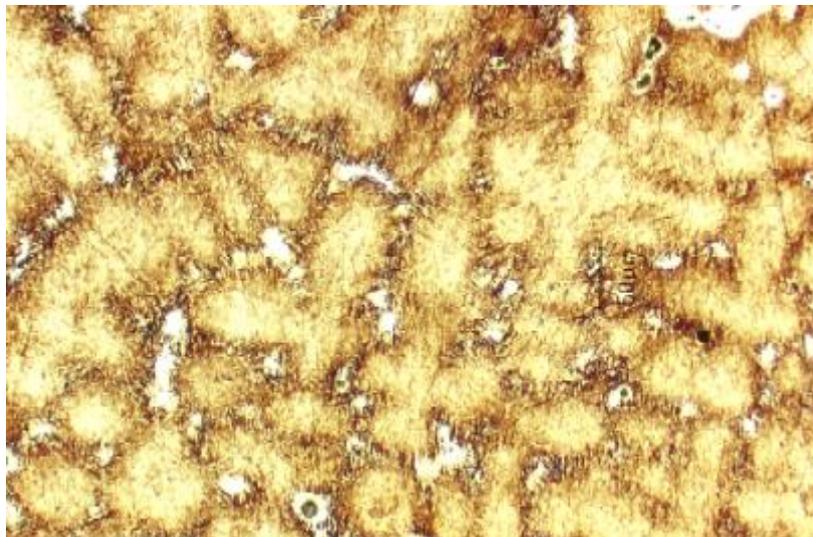
Dureza:

Media: 357 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir con austenita retenida y carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza muy superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo mayor extensión de las zonas reaustenizadas que han templado en el enfriamiento.

Probeta 5.17. Colada 5 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	4	0,5	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

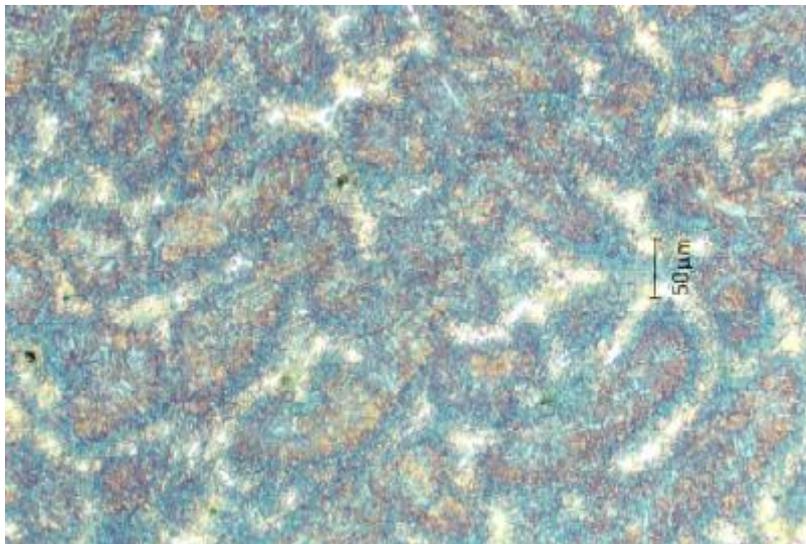
Dureza:

Media: 263 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza similar a la del estado hipertemplado. La temperatura de tratamiento es tan alta que ha austenizado el material, dejándolo en condiciones similares al hipertemple salvo por la presencia de carburos de mayor tamaño y menor microsegregación.

Probeta 6.1. Colada 6 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

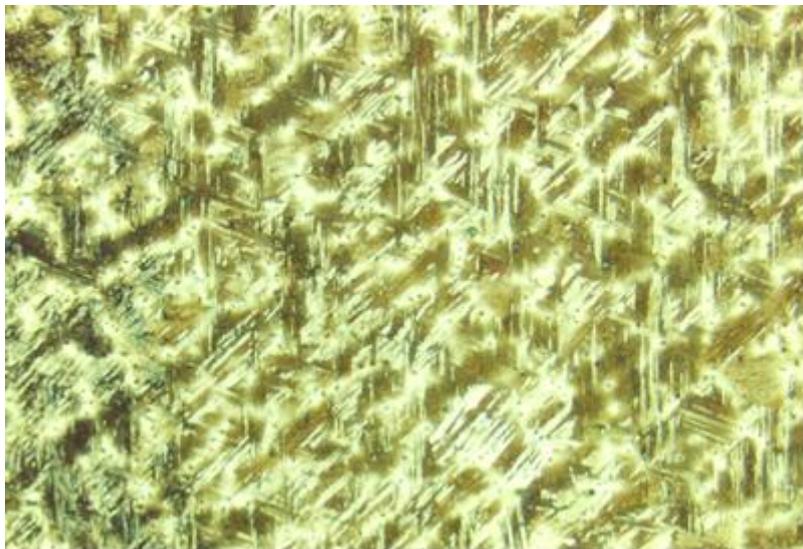
Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Se mantiene la configuración habitual de martensita en los troncos dendríticos y austenita retenida en las lagunas interdendríticas.

Probeta 6.2. Colada 6 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

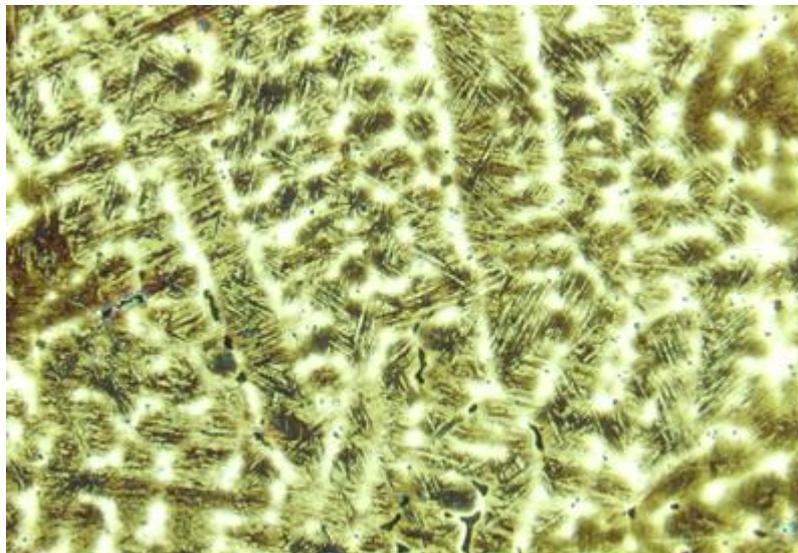
Dureza:

Media: 300 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior salvo por el ligero endurecimiento ya justificado en coladas anteriores.

Probeta 6.3. Colada 6 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

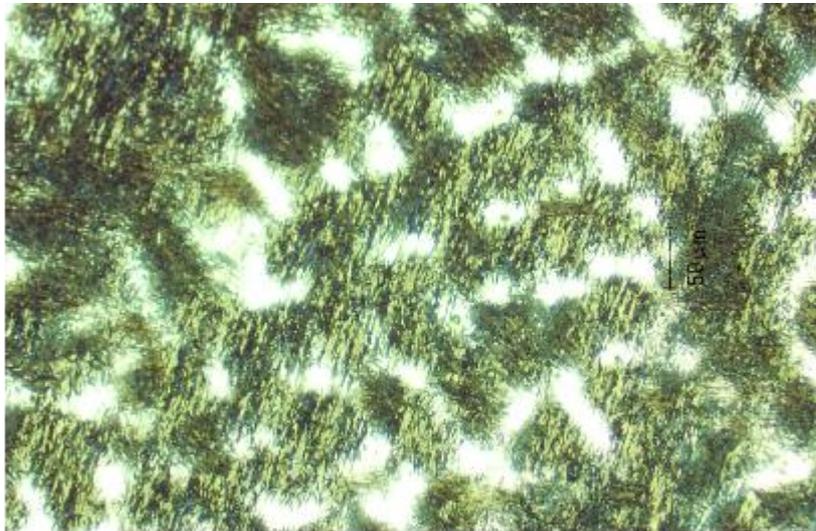
Dureza:

Media: 268 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior salvo por el ligero ablandamiento ya justificado en coladas anteriores.

Probeta 6.4. Colada 6 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

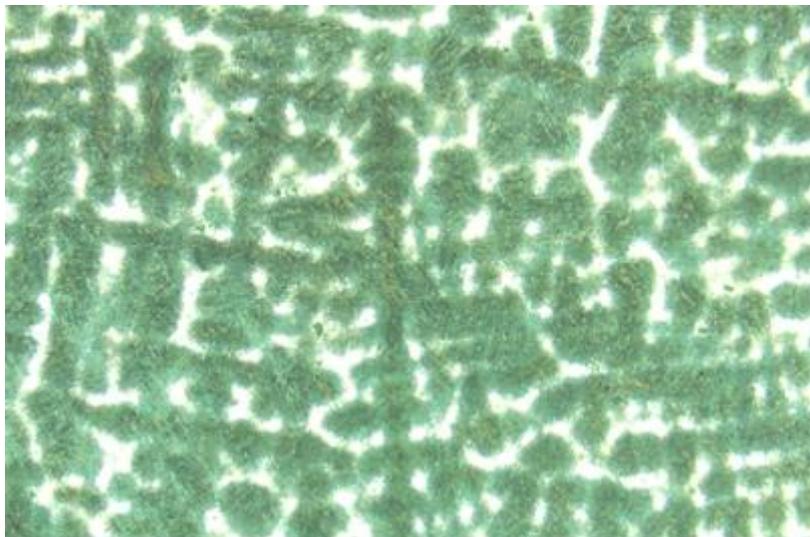
Dureza:

Media: 230 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior.

Probeta 6.5. Colada 6 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

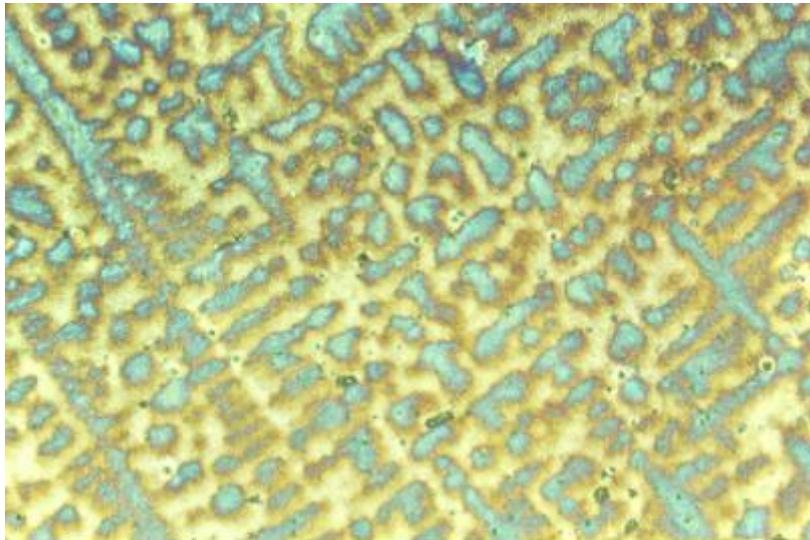
Dureza:

Media: 263 HB

Microestructura:

Martensita revenida con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior.

Probeta 6.6. Colada 6 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

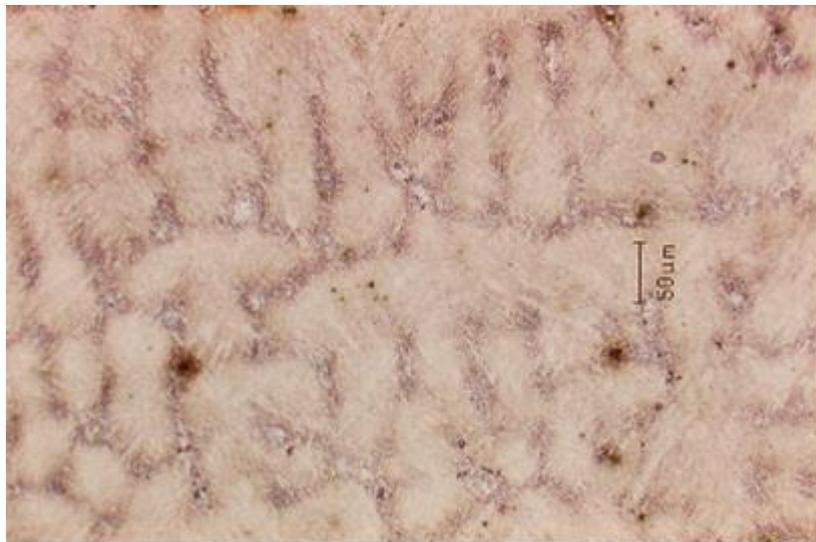
Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior.

Probeta 6.7. Colada 6 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

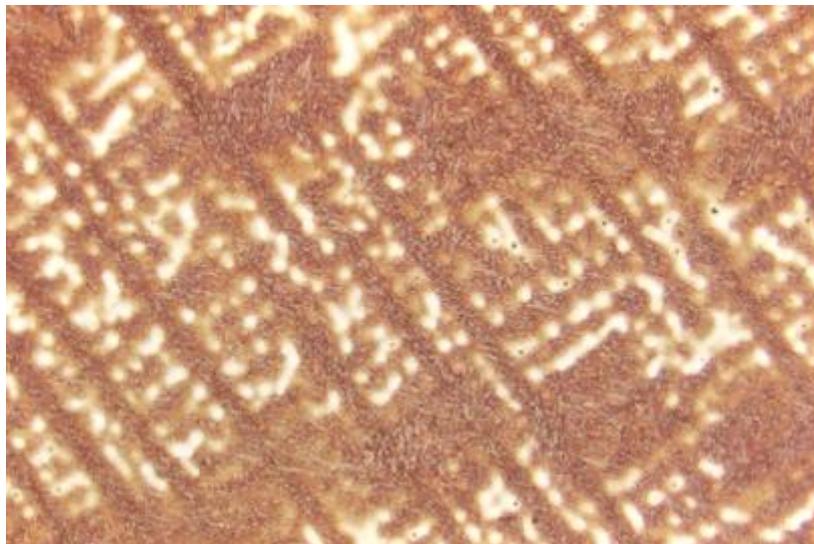
Dureza:

Media: 247 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios sobre la probeta anterior.

Probeta 6.8. Colada 6 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

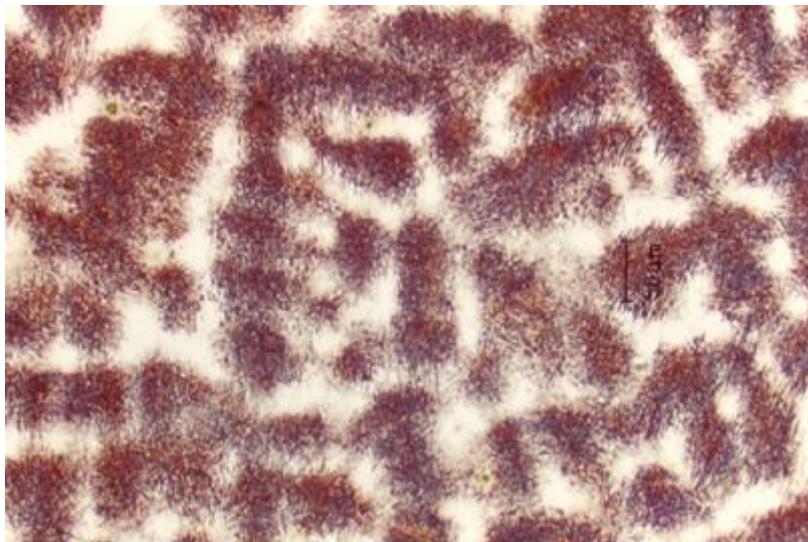
Dureza:

Media: 329 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables sobre la probeta anterior.

Probeta 6.9. Colada 6 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

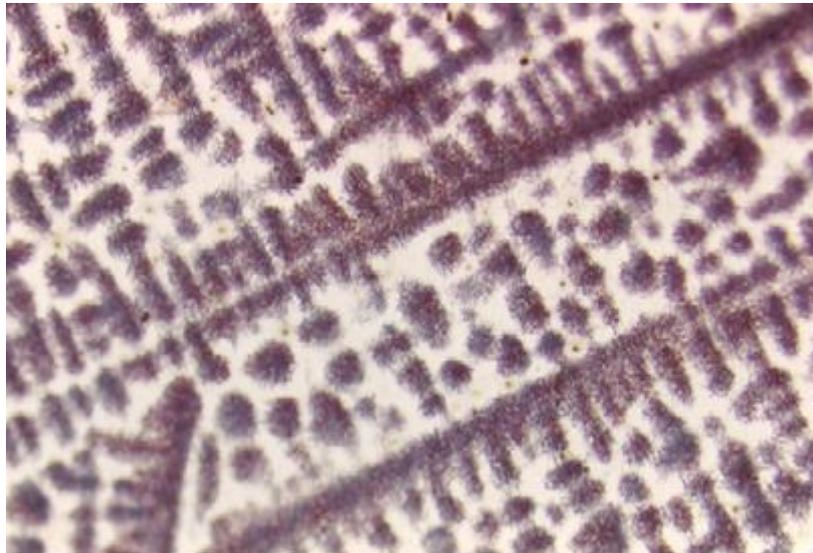
Dureza:

Media: 228 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables sobre la probeta anterior.

Probeta 6.10. Colada 6 Tratamiento a 550°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

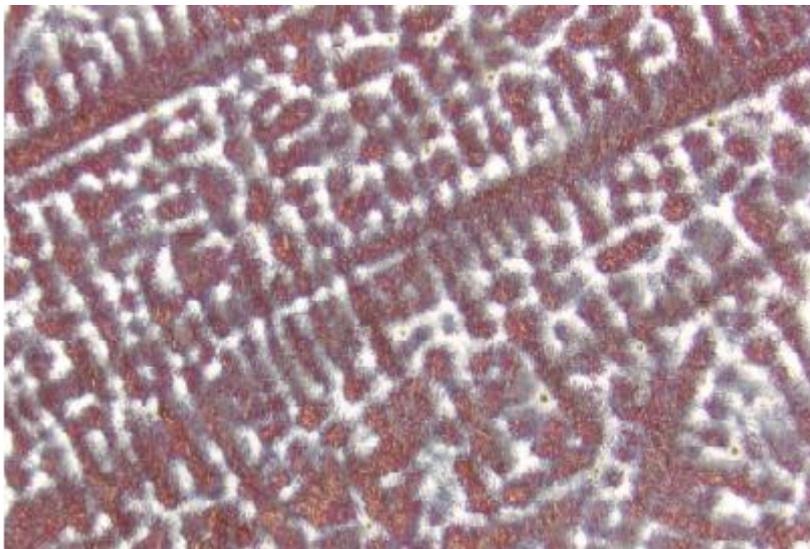
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 287 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Comienza la aparición de zonas de perlita.

Probeta 6.11. Colada 6 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

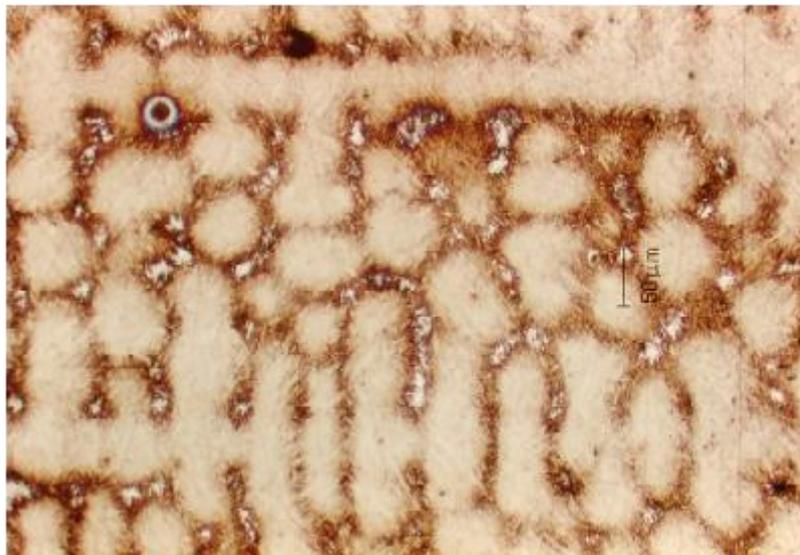
Dureza:

Media: 348 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Continúa la evolución observada en la dos probeta anterior junto con la aparición de carburos más grandes.

Probeta 6.12. Colada 6 Tratamiento a 650°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

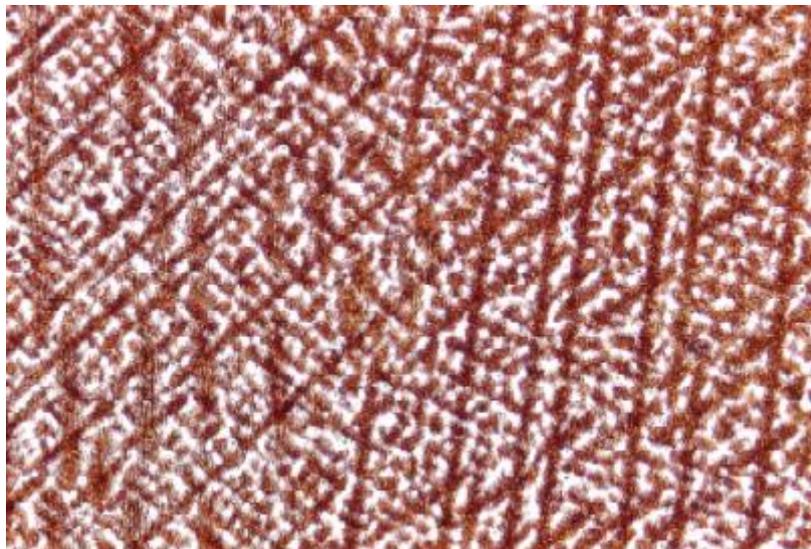
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 319 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables sobre el estado anterior.

Probeta 6.13. Colada 6 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

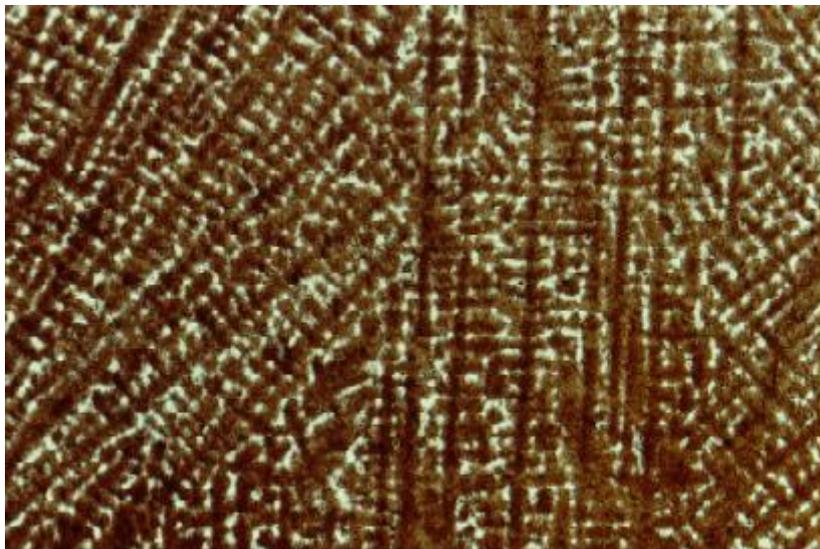
Dureza:

Media: 371 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. La cantidad de perlita sigue aumentando.

Probeta 6.14. Colada 6 Tratamiento a 750°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

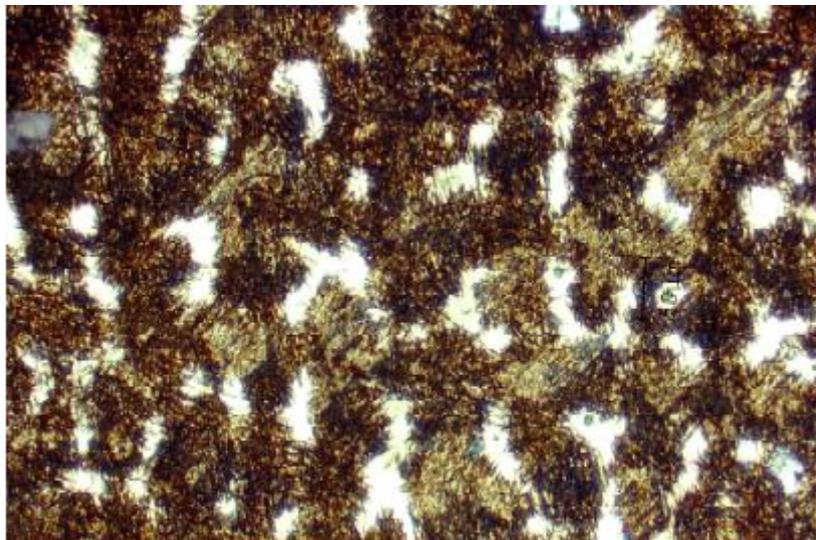
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 388 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con la probeta anterior.

Probeta 6.15. Colada 6 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

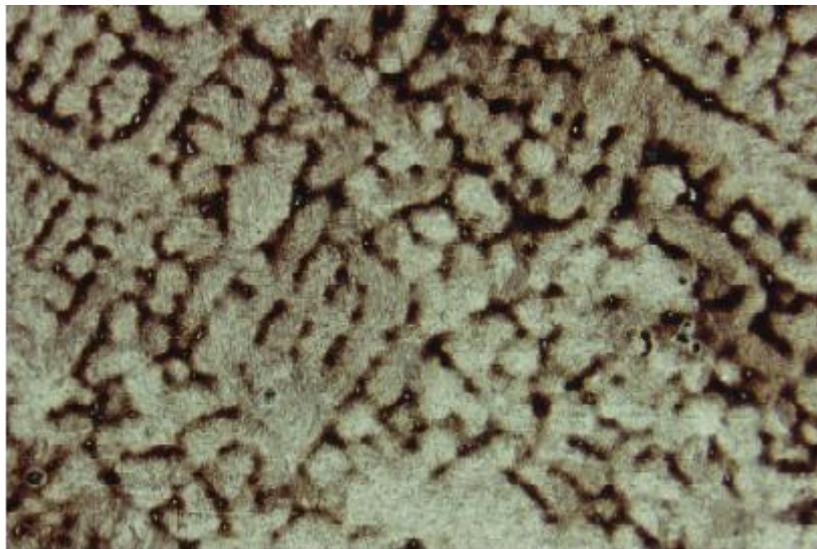
Dureza:

Media: 360 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Casi no existe austenita retenida y la extensión de la perlita es mucho mayor. Algunas zonas han reaustenizado templando en el enfriamiento.

Probeta 6.16. Colada 6 Tratamiento a 850°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

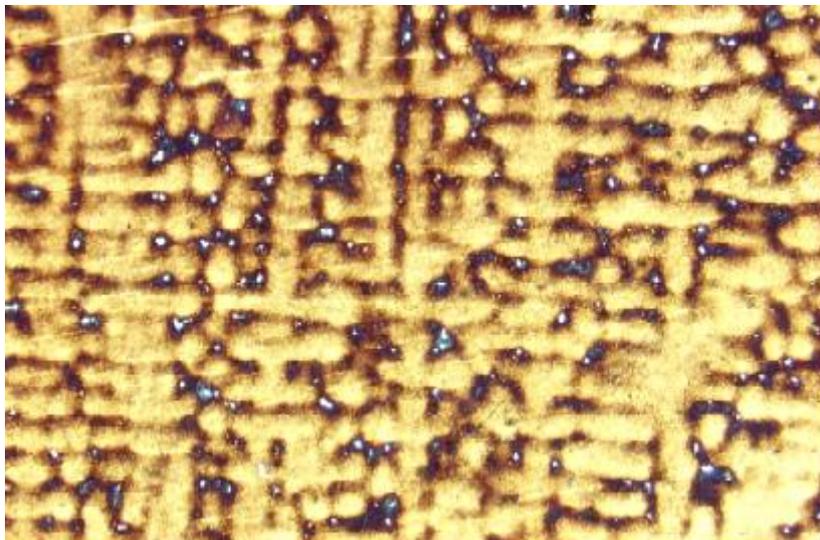
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 359 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Probeta reaustenizada que ha templado parcialmente en el enfriamiento. La baja temperatura de temple impide la disolución completa de los carburos.

Probeta 6.17. Colada 6 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,5	6	0,2	3	2	0

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

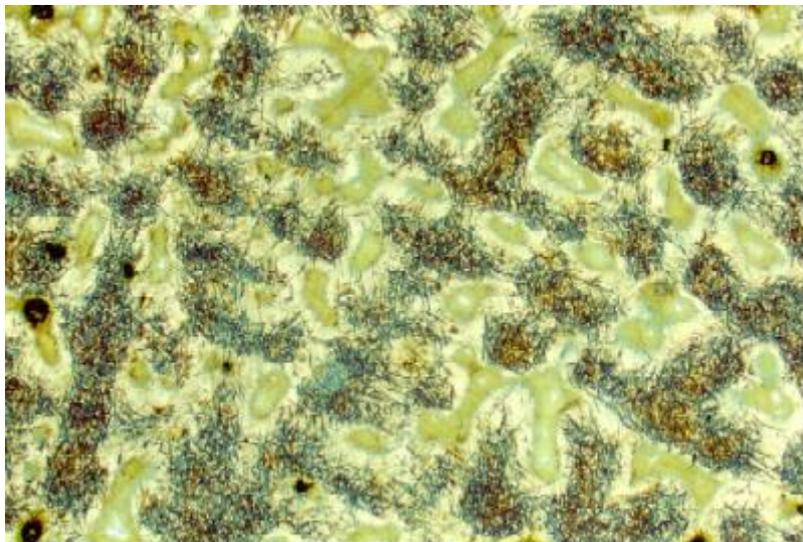
Dureza:

Media: 311 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza inferior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al estado anterior.

Probeta 7.1. Colada 7 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

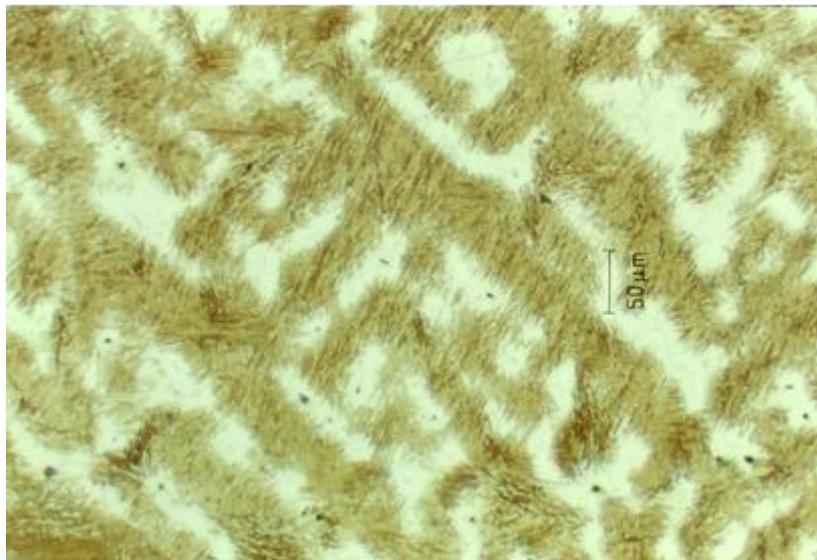
Dureza:

Media: 311 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. El mantenimiento a baja temperatura ha endurecido el acero. Es el mismo caso de las probetas anteriores pero observable en esta desde el primer tratamiento.

Probeta 7.2. Colada 7 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

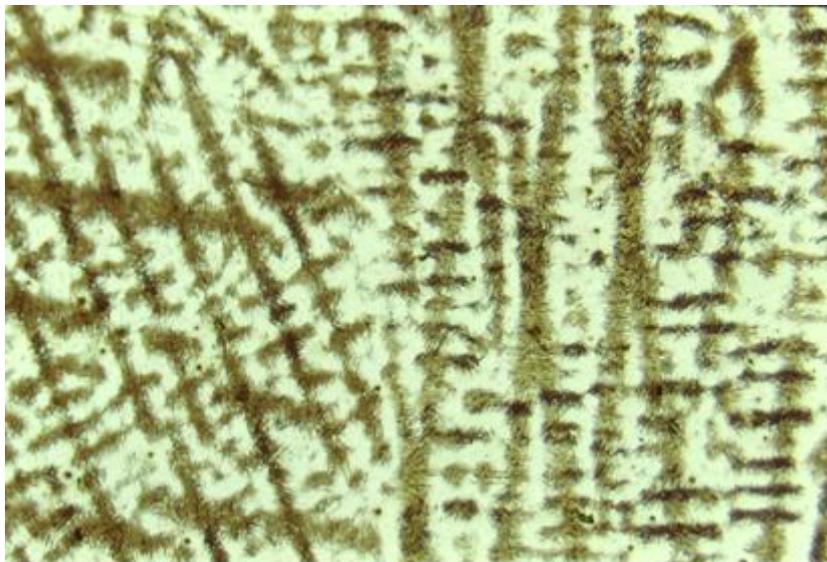
Dureza:

Media: 335 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables sobre el estado anterior.

Probeta 7.3. Colada 7 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

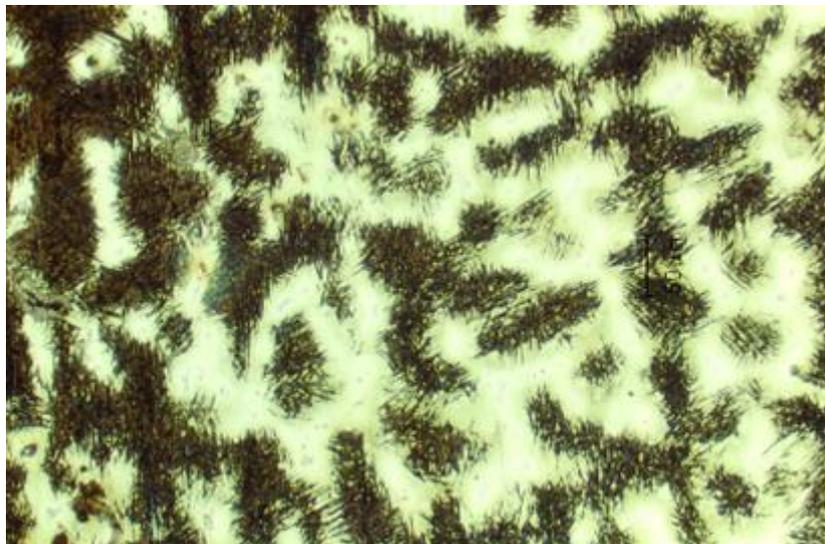
Dureza:

Media: 241 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. El ablandamiento de la probeta corresponde al final de la anomalía de dureza de baja temperatura.

Probeta 7.4. Colada 7 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

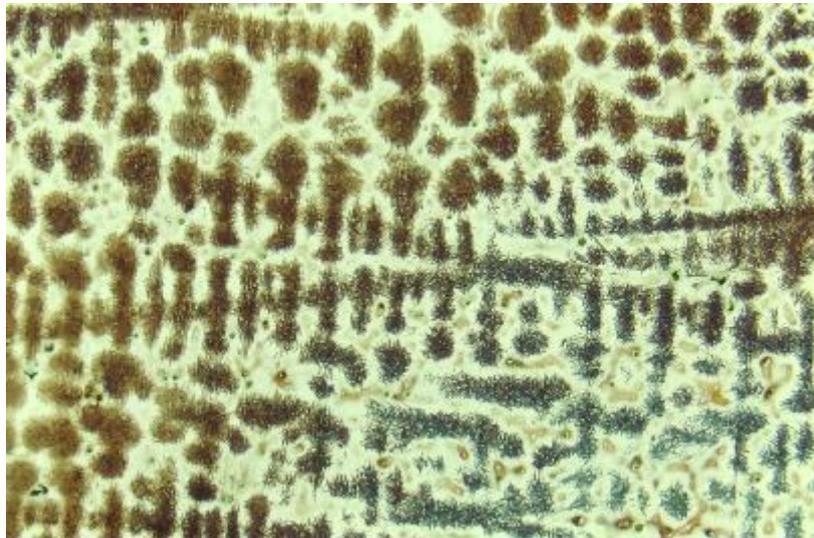
Dureza:

Media: 262 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables con respecto al estado anterior.

Probeta 7.5. Colada 7 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

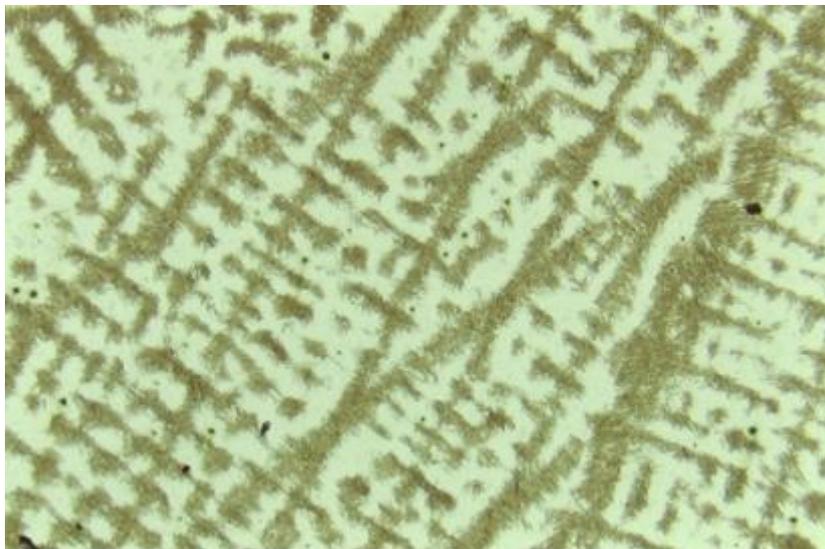
Dureza:

Media: 244 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios apreciables con respecto al estado anterior.

Probeta 7.6. Colada 7 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

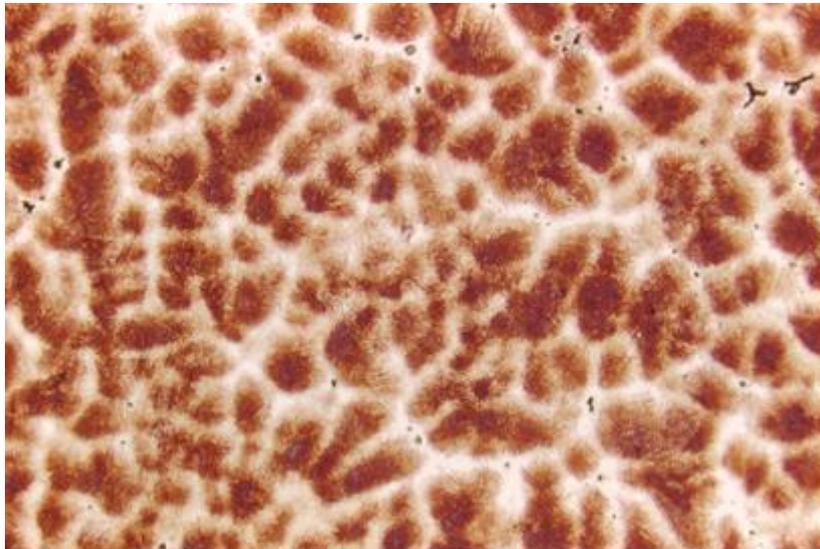
Dureza:

Media: 247 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior. Como en casi todos los productos fundidos, la gran heterogeneidad química hace que localmente la cantidad de constituyentes fluctúe bastante.

Probeta 7.7. Colada 7 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

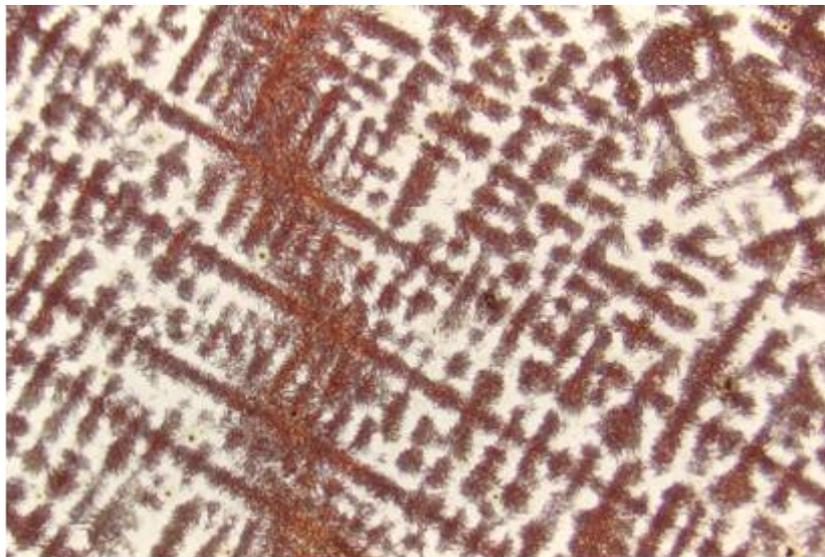
Dureza:

Media: 243 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior. En esta imagen se aprecia la heterogeneidad morfológica debida probablemente a un antiguo borde de grano o macla.

Probeta 7.8. Colada 7 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

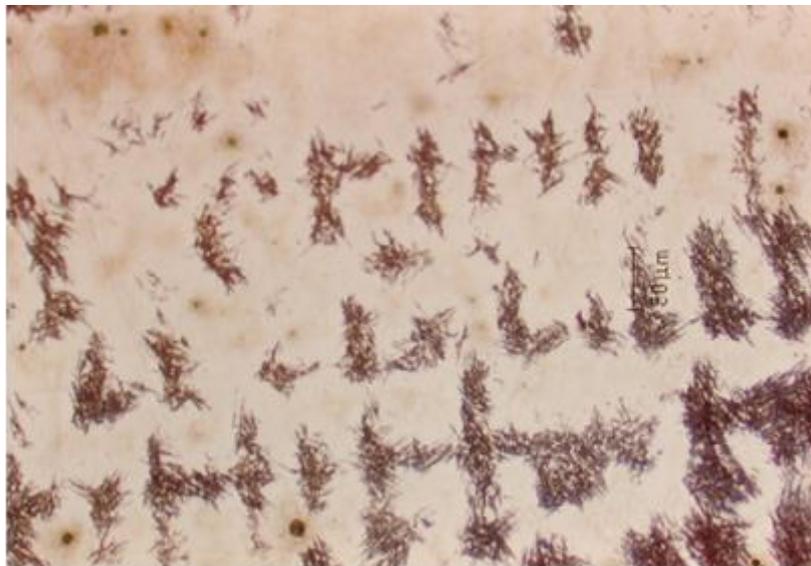
Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior. La heterogeneidad puede producir partes con ausencia casi total de martensita por enriquecimiento en aleantes, principalmente manganeso.

Probeta 7.9. Colada 7 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

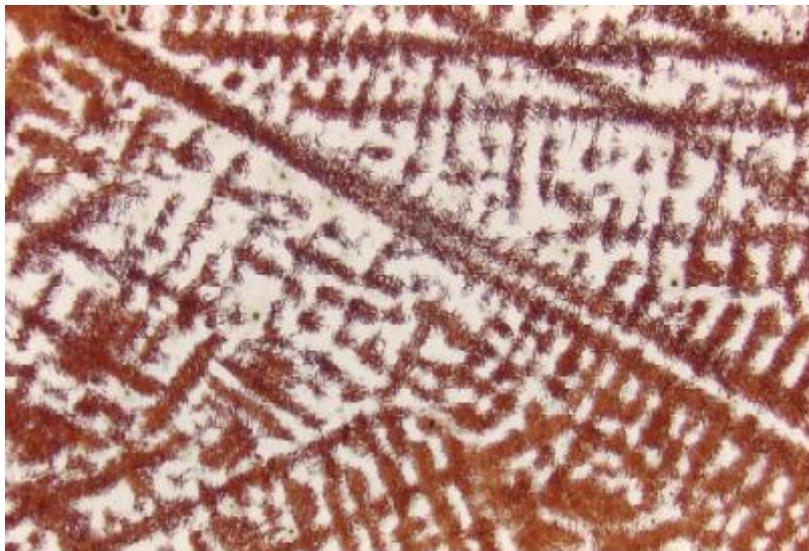
Dureza:

Media: 265 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior.

Probeta 7.10. Colada 7 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

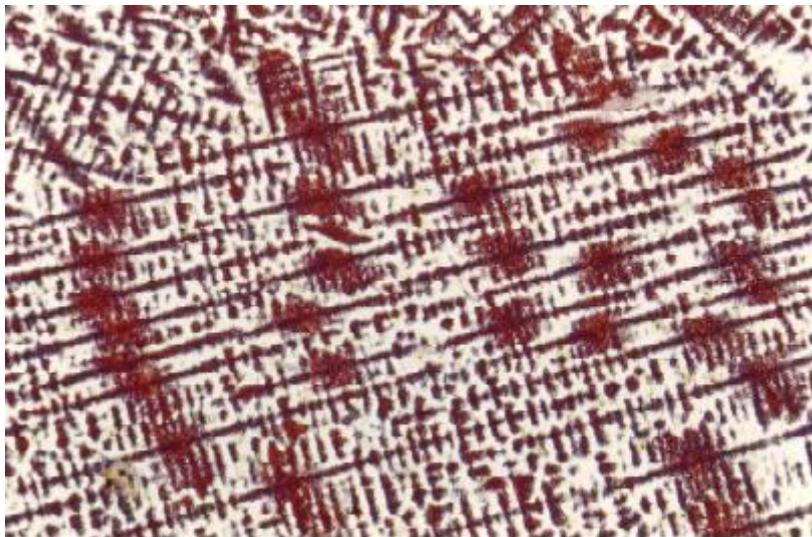
Dureza:

Media: 339 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La heterogeneidad presenta a veces morfología puntual como en este caso. Comienza a observarse un ligero endurecimiento por la incipiente aparición de perlita.

Probeta 7.11. Colada 7 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 331 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipotemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior. Cuando la heterogeneidad morfológica se presenta en forma de líneas paralelas puede ser debida a maclas o incluso a defectos en el corte y preparación de la probeta.

Probeta 7.12. Colada 7 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 333 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior.

Probeta 7.13. Colada 7 Tratamiento a 700°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

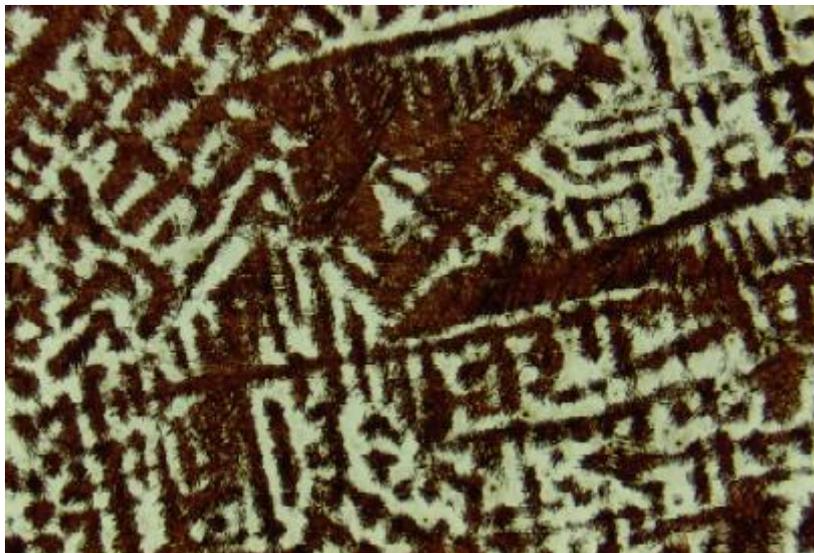
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 296 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos con respecto al estado anterior.

Probeta 7.14. Colada 7 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

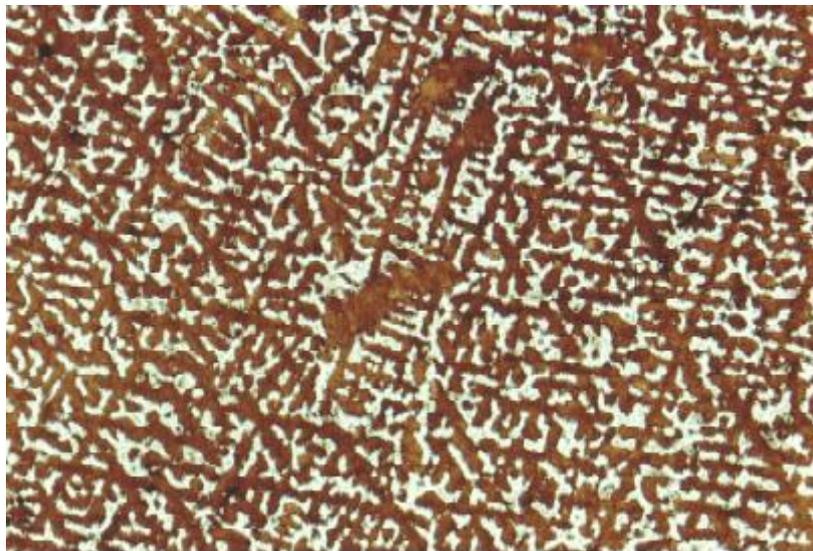
Dureza:

Media: 282 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior.

Probeta 7.15. Colada 7 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo. Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

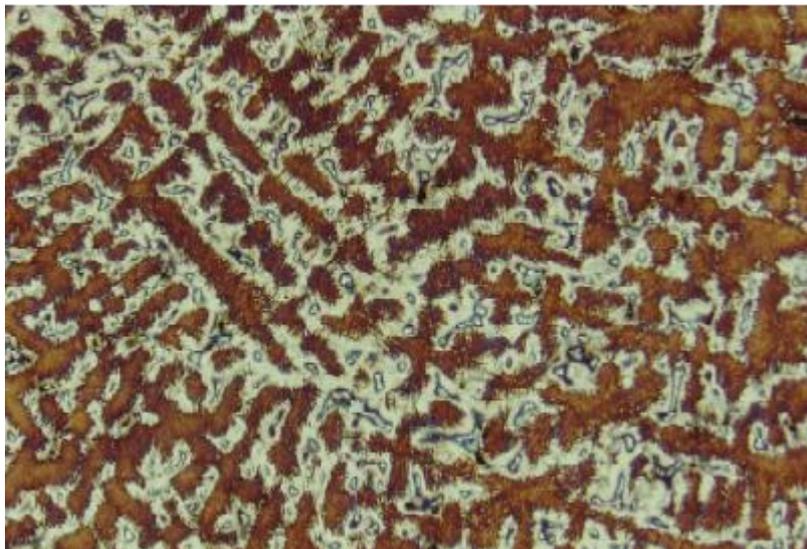
Dureza:

Media: 292 HB

Microestructura:

Martensita revenida con perlita y austenita retenida. Carburos dispersos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Los espacios interdendríticos se han reaustenizado con precipitación de carburos en los mismos. La perlita aparece ya significativamente junto a la martensita revenida en las zonas que no han vuelto a austenizar.

Probeta 7.16. Colada 7 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

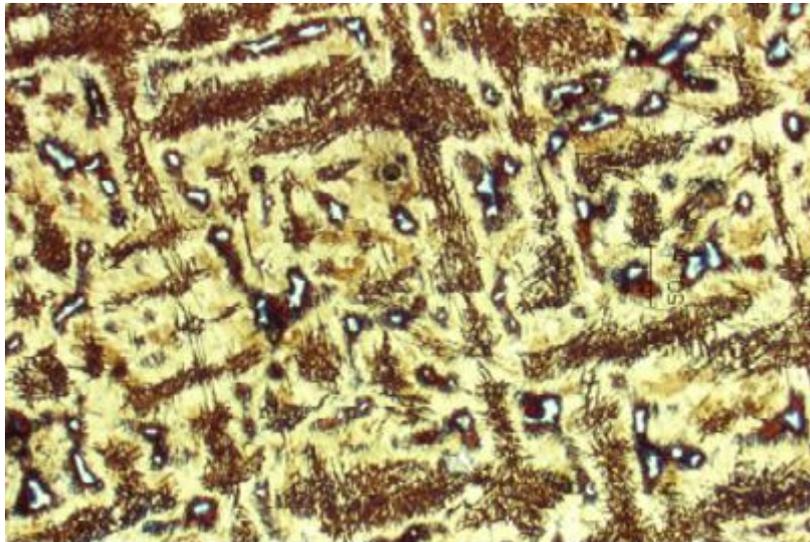
Dureza:

Media: 339 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. La probeta ha reaustenizado casi por completo pero a una temperatura insuficiente para la redisolución de carburos.

Probeta 7.17. Colada 7 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	7	0,5	2	2	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

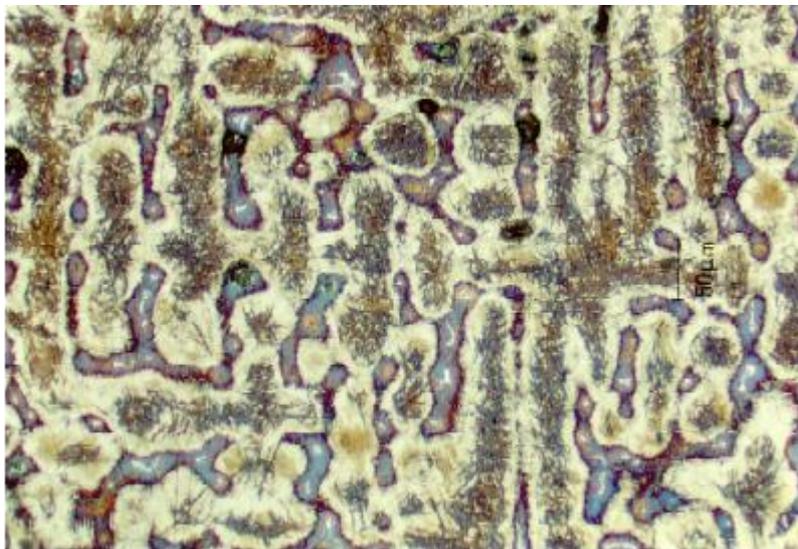
Dureza:

Media: 337 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del estado hipertemplado. Sin cambios significativos sobre el estado anterior.

Probeta 8.1. Colada 8 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

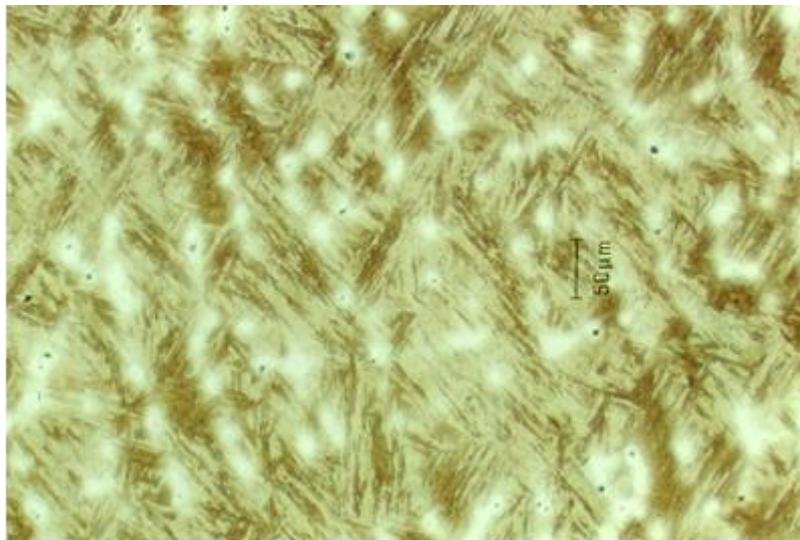
Dureza:

Media: 320 HB

Microestructura:

Martensita con matriz de austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior al estado hipertemplado. El endurecimiento de baja temperatura ha comenzado desde el primer tratamiento.

Probeta 8.2. Colada 8 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

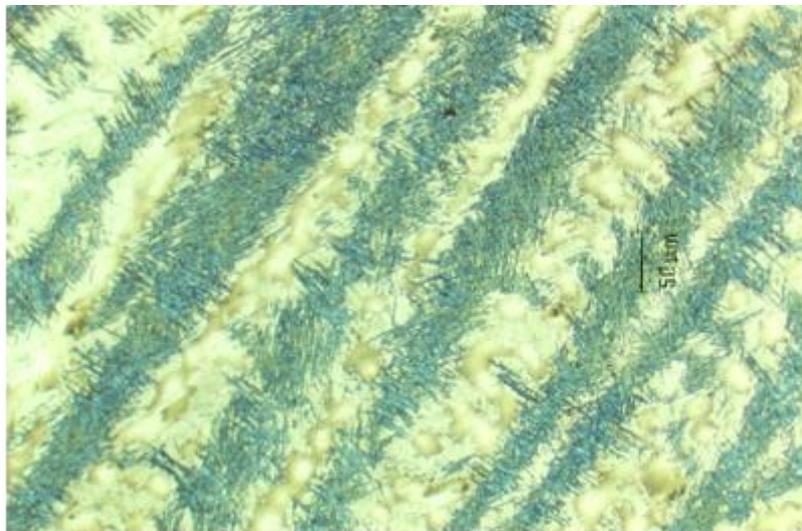
Dureza:

Media: 262 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja con austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con semejanza a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.3. Colada 8 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 239 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.4. Colada 8 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

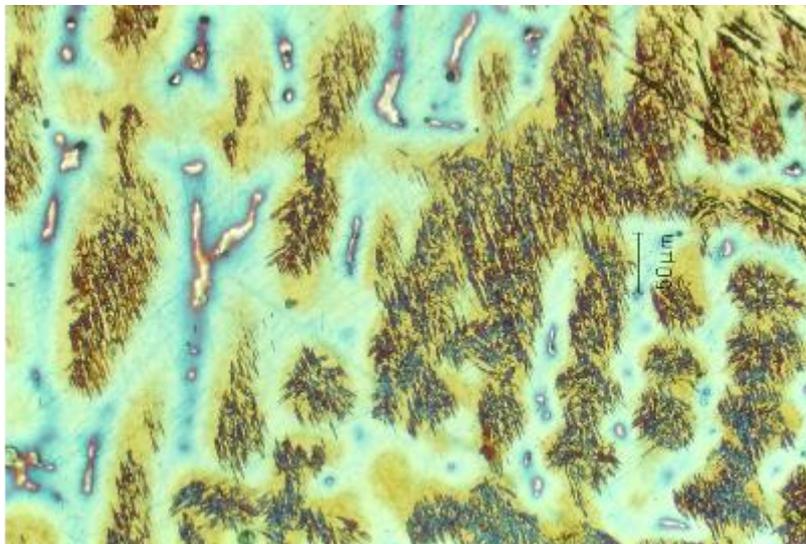
Dureza:

Media: 248 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Se pueden apreciar zonas en el interior de las piezas donde existen carburos que no han sido disueltos por el hipertemple.

Probeta 8.5. Colada 8 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

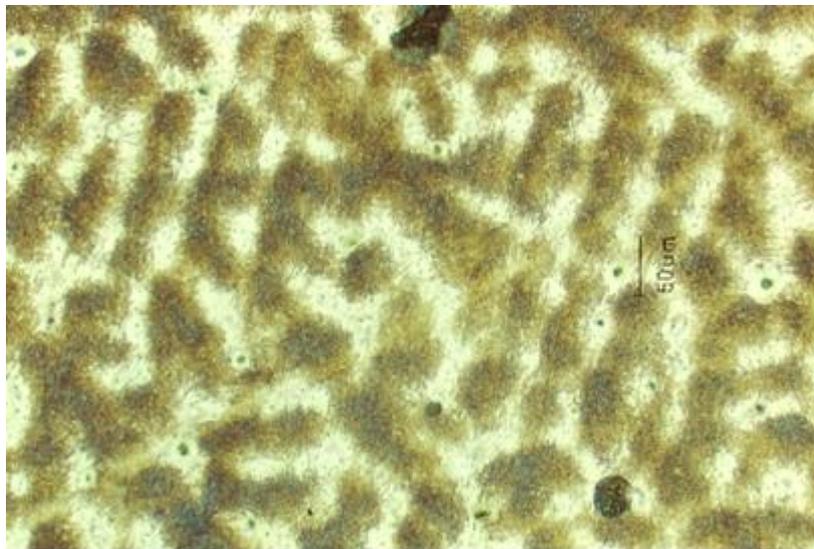
Dureza:

Media: 230 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.6. Colada 8 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

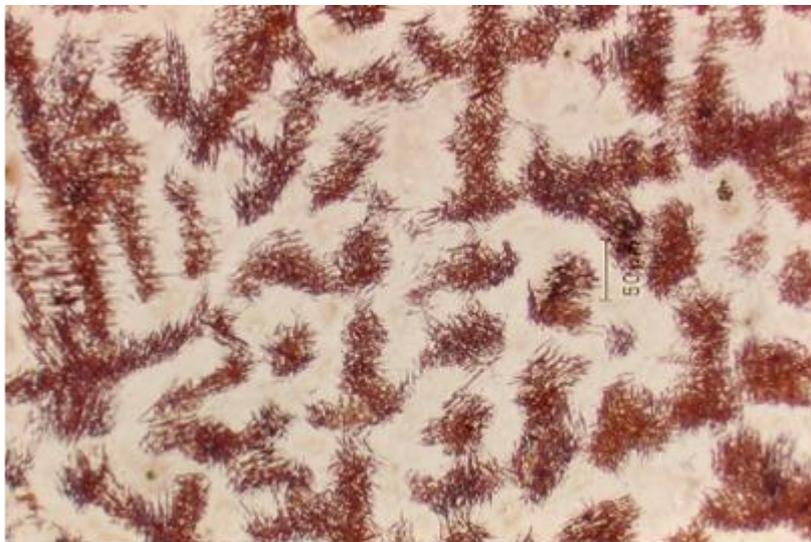
Dureza:

Media: 258 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.7. Colada 8 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 265 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.8. Colada 8 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

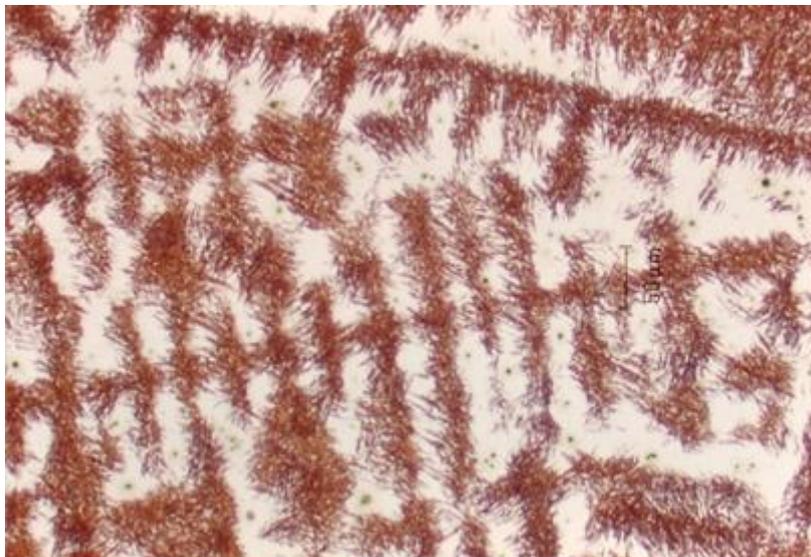
Dureza:

Media: 251 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.9. Colada 8 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

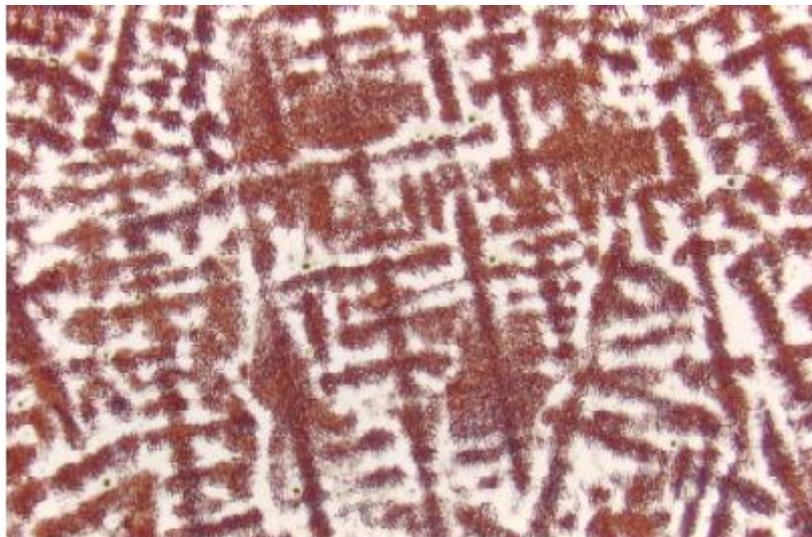
Dureza:

Media: 261 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza semejante a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.10. Colada 8 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 309 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Empieza la aparición de zonas perlíticas.

Probeta 8.11. Colada 8 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 369 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo la cantidad de perlita.

Probeta 8.12. Colada 8 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 381 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.13. Colada 8 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 280 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. La perlita se hace menos frecuente y de mayor espaciado interlaminar.

Probeta 8.14. Colada 8 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 344 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir, perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Comienza la austenización de algunas zonas que templan en el enfriamiento.

Probeta 8.15. Colada 8 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

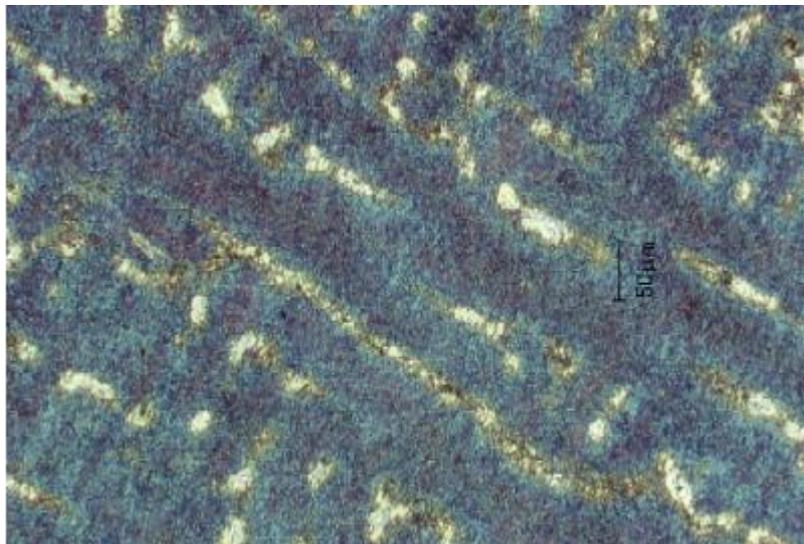
Dureza:

Media: 329 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. La reausatenización es completa y la baja temperatura no redisuelve los carburos.

Probeta 8.16. Colada 8 Tratamiento a 850°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

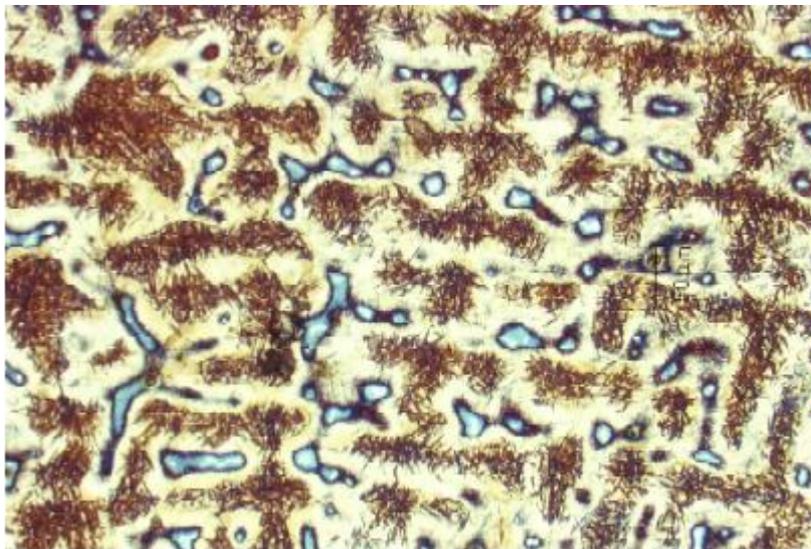
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 333 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 8.17. Colada 8 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,7	6	0,3	2	1.5	1

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

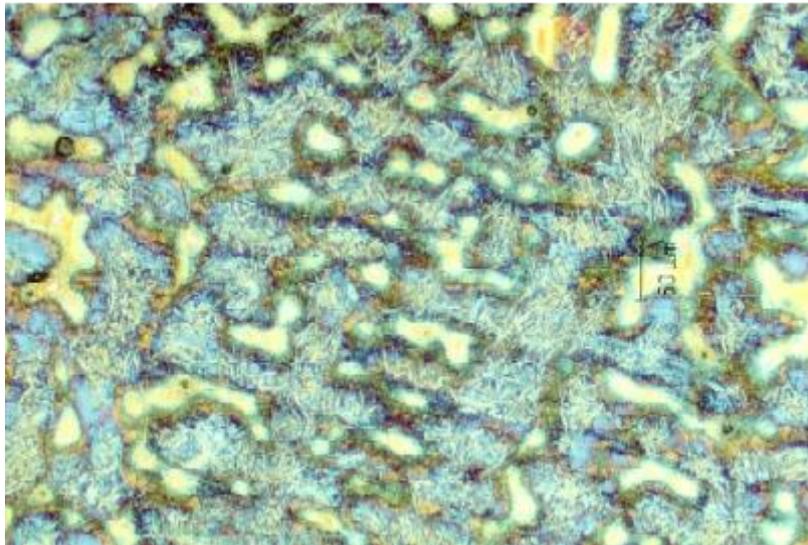
Dureza:

Media: 268 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo una menor cantidad de carburos.

Probeta 9.1. Colada 9 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 289 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. De nuevo la dureza de baja temperatura comienza desde el primer tratamiento.

Probeta 9.2. Colada 9 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

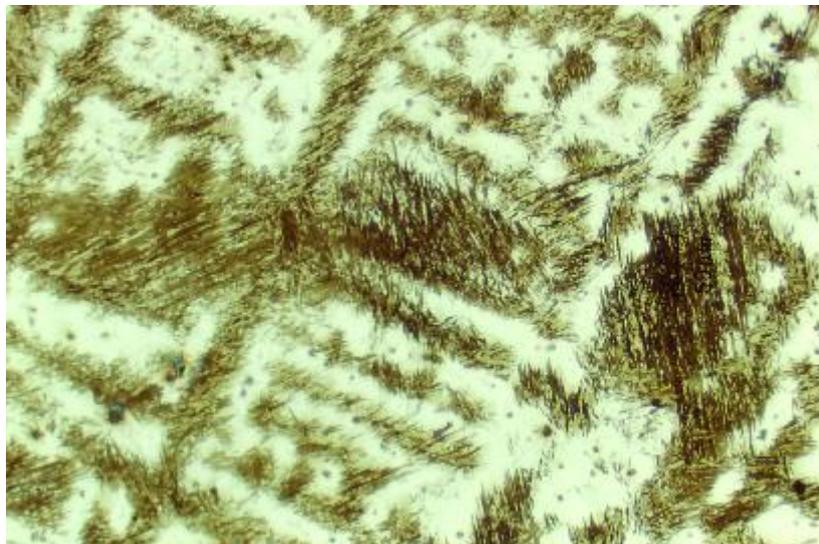
Dureza:

Media: 312 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.3. Colada 9 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

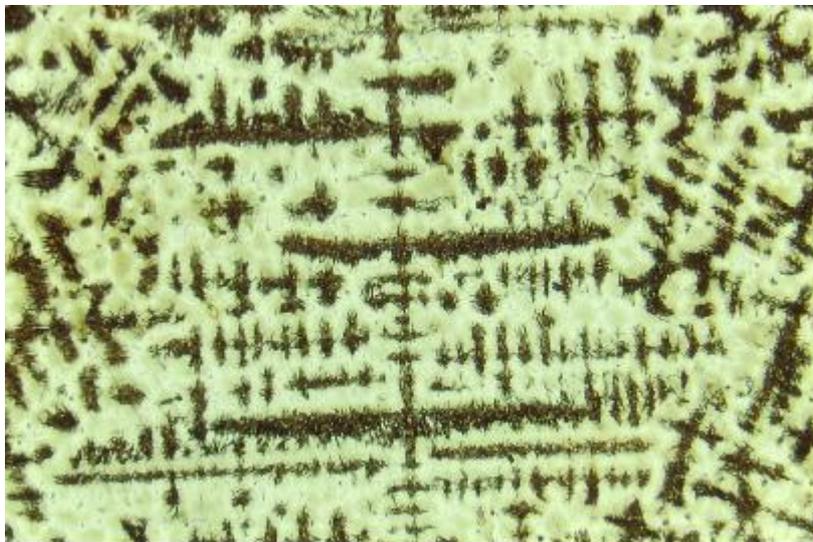
Dureza:

Media: 260 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Desaparece la dureza anómala.

Probeta 9.4. Colada 9 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

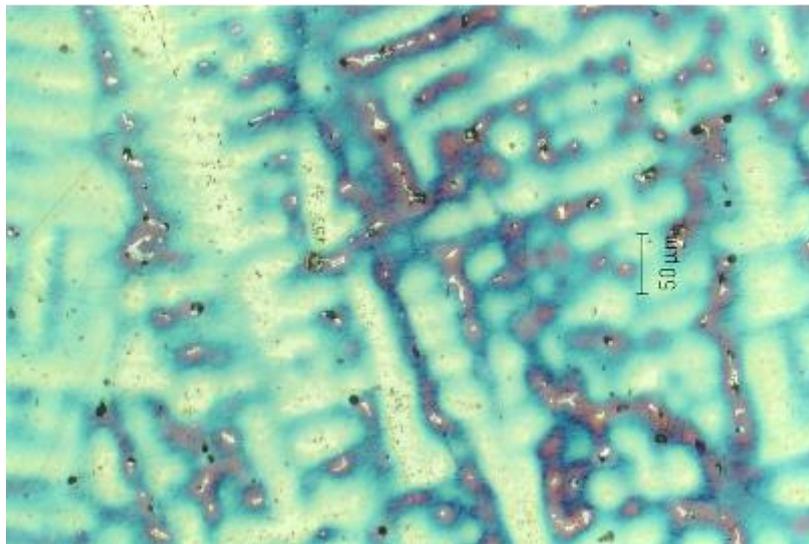
Dureza:

Media: 248 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.5. Colada 9 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

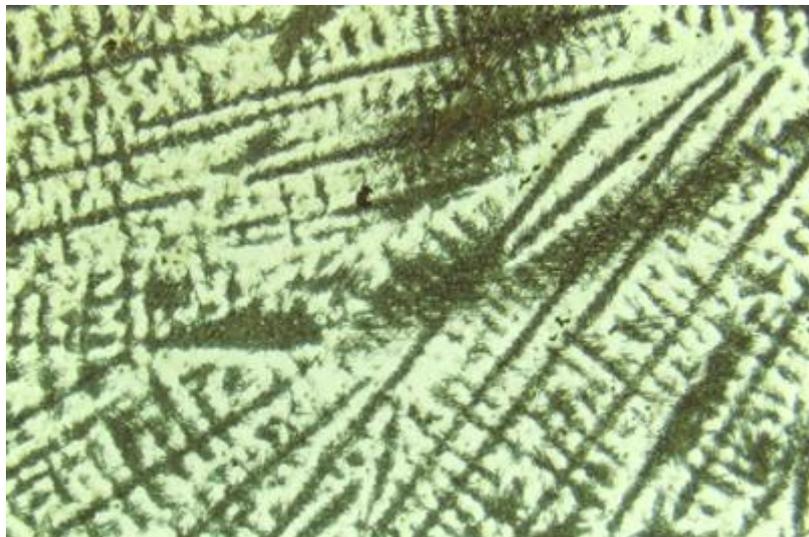
Dureza:

Media: 233 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.6. Colada 9 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

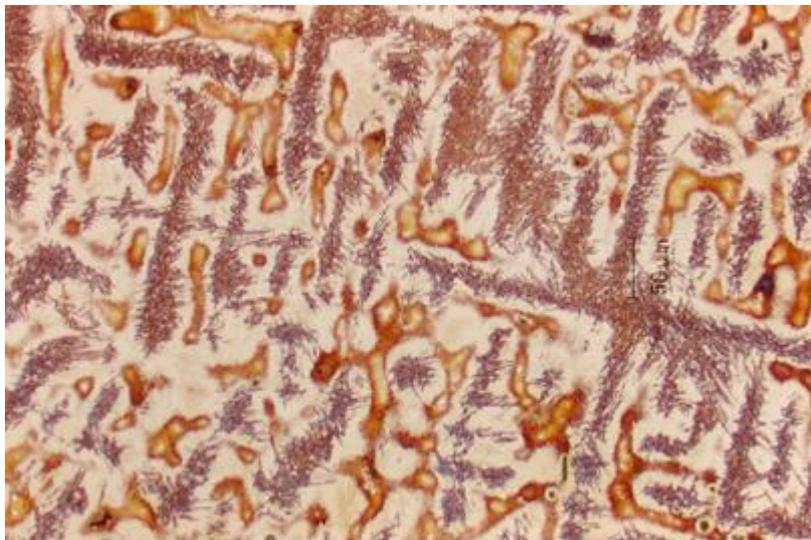
Dureza:

Media: 258 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.7. Colada 9 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

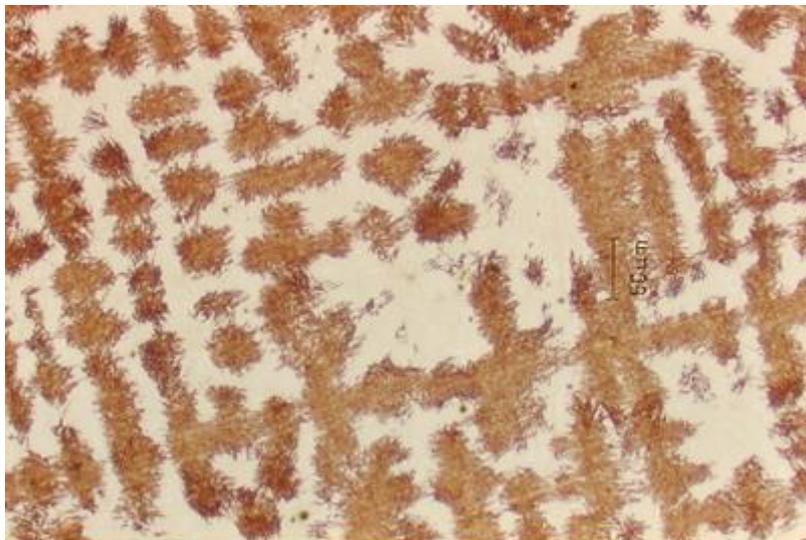
Dureza:

Media: 258 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.8. Colada 9 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

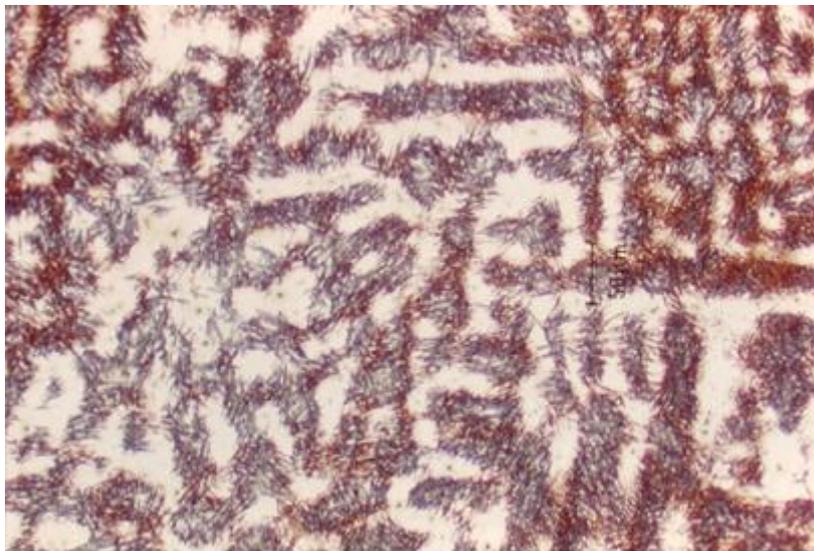
Dureza:

Media: 249 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.9. Colada 9 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

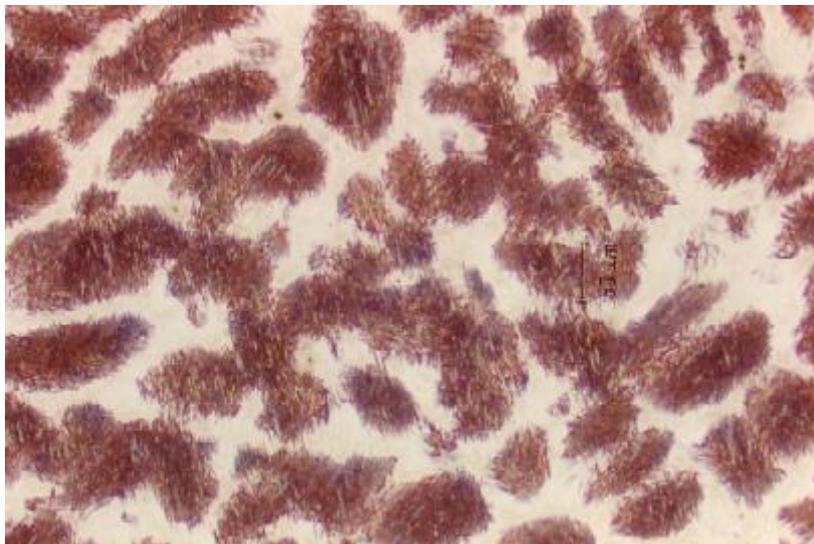
Dureza:

Media: 255 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.10. Colada 9 Tratamiento a 550°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

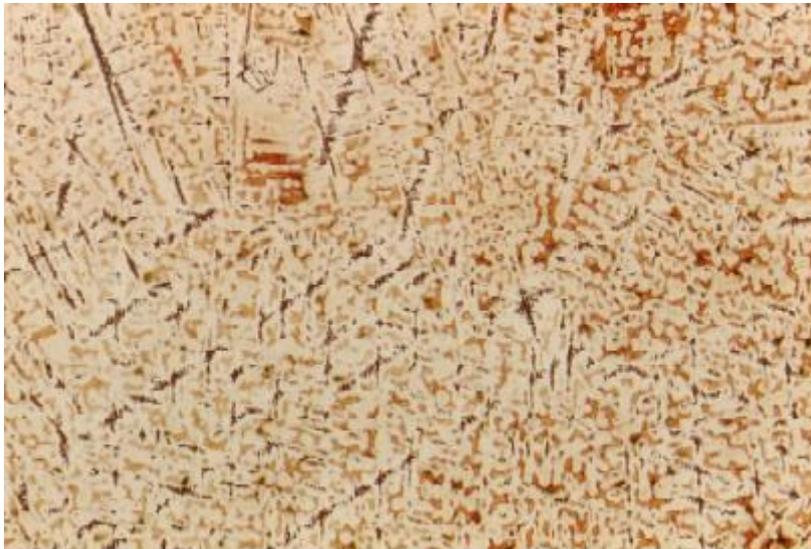
Dureza:

Media: 319 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. No se aprecia perlita pero por el incremento de dureza es posible concluir un precipitado submicroscópico de carburos de elementos de aleación. El alto nivel de cromo, molibdeno y carbono y la temperatura de aparición apoyan la teoría.

Probeta 9.11. Colada 9 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

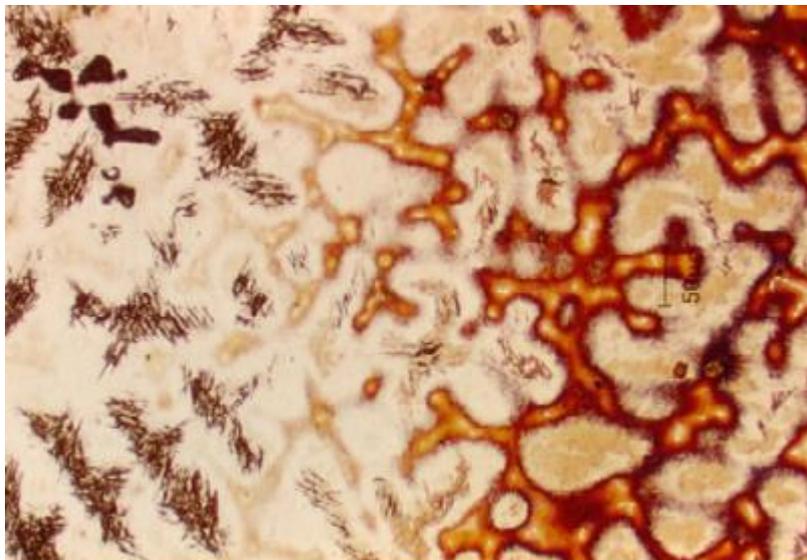
Dureza:

Media: 313 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.12. Colada 9 Tratamiento a 650°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

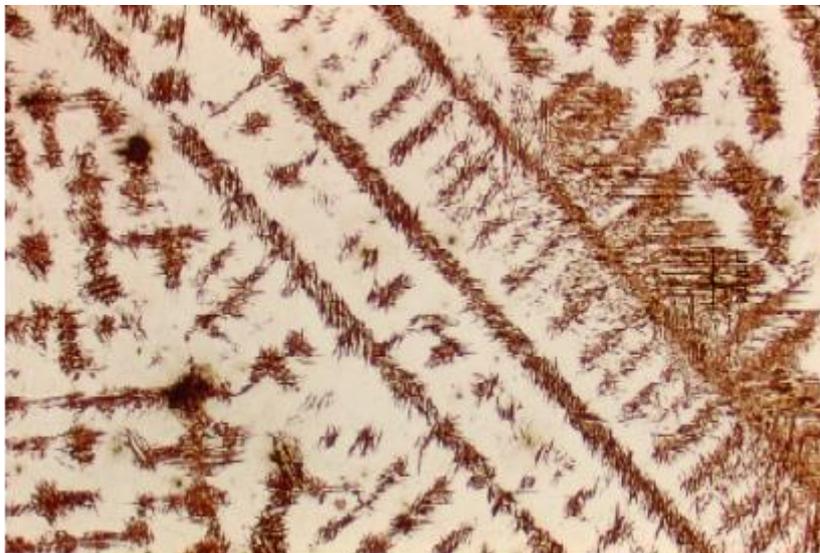
Dureza:

Media: 333 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.13. Colada 9 Tratamiento a 700°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

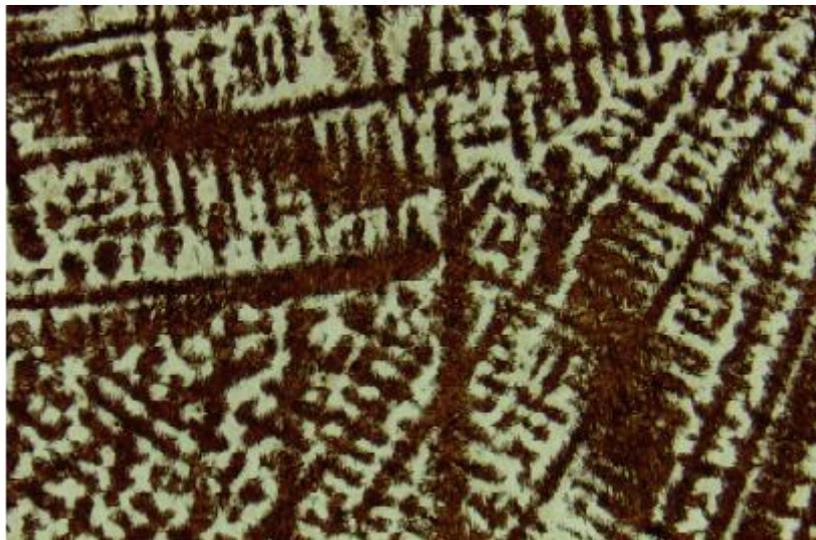
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 285 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Empieza a disminuir el efecto endurecedor anterior y aparecen pequeñas zonas de perlita.

Probeta 9.14. Colada 8 Tratamiento a 750°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

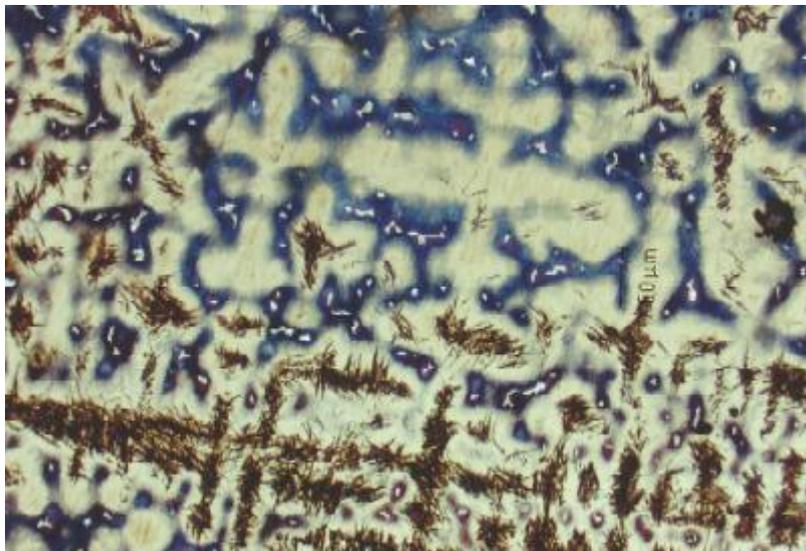
Dureza:

Media: 321 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. La probeta ha reaustenizado pero no ha redisuelto los carburos.

Probeta 9.15. Colada 9 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

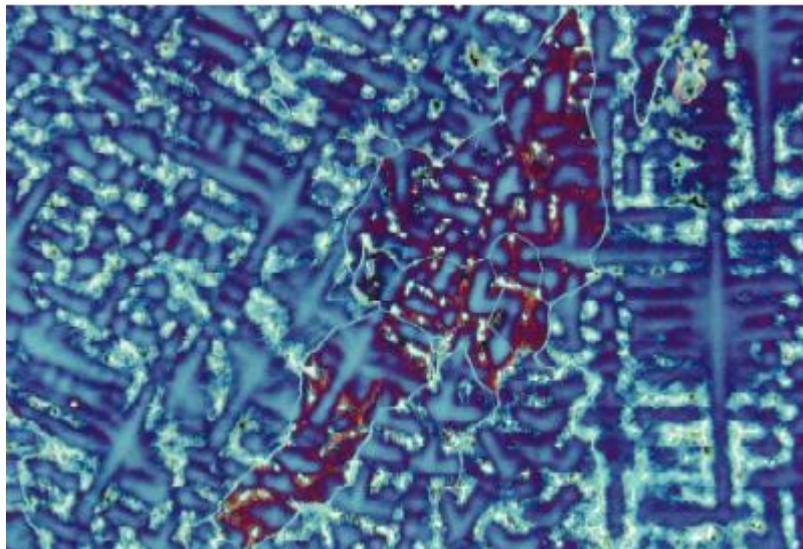
Dureza:

Media: 321 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 9.16. Colada 9 Tratamiento a 850°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

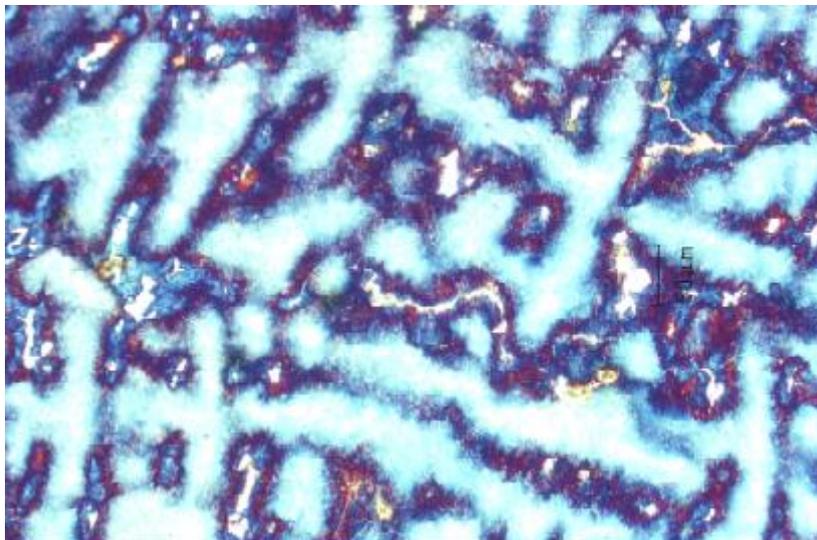
Dureza:

Media: 331 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. La gran cantidad de carbono hace que los carburos empiecen a adoptar morfología reticular

Probeta 9.17. Colada 9 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,8	8	0,5	2	2	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

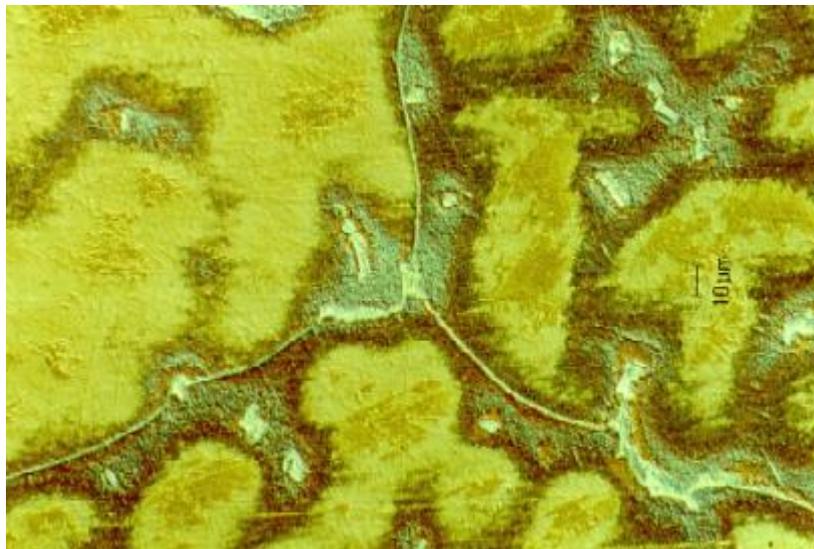
Dureza:

Media: 303 HB

Microestructura:

Martensita sin revenir y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior. En algunas zonas el borde de grano ha sido completamente poblado por una red de carburo

Probeta 10.1. Colada 10 Tratamiento a 100°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 100° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

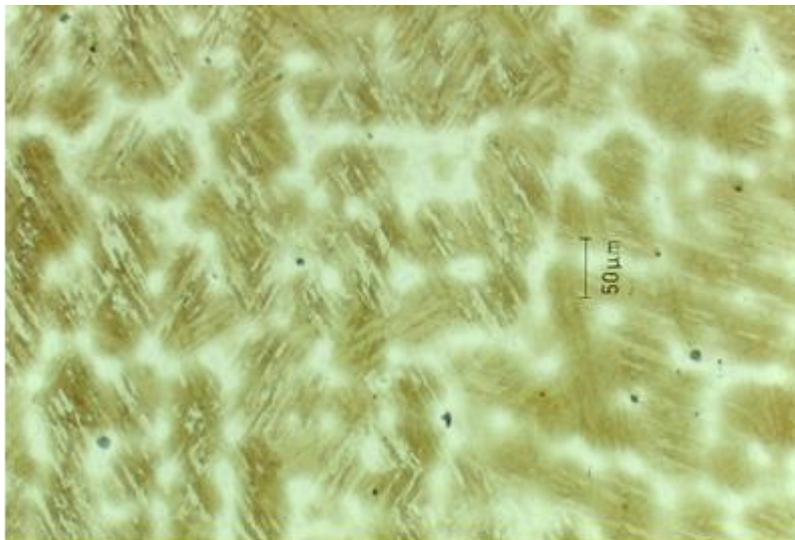
Dureza:

Media: 331 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. El incremento de dureza se da como en probetas anteriores.

Probeta 10.2. Colada 10 Tratamiento a 150°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 150° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

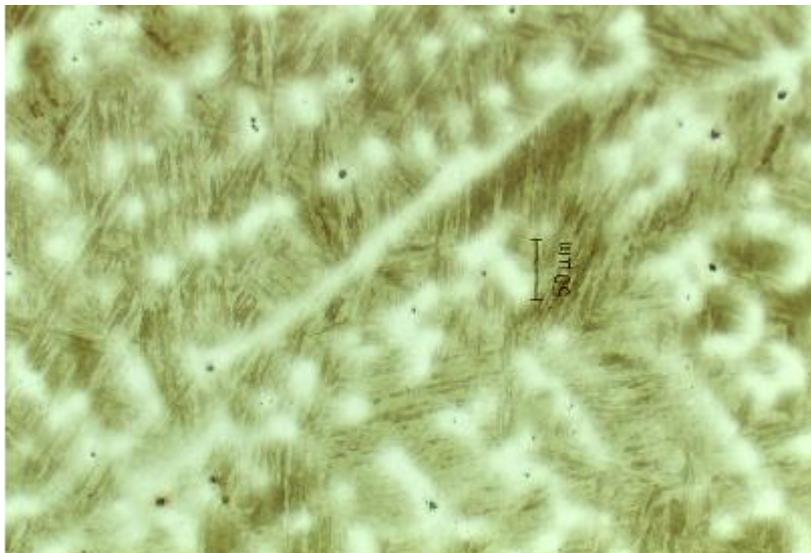
Dureza:

Media: 352 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.3. Colada 10 Tratamiento a 200°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 200° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

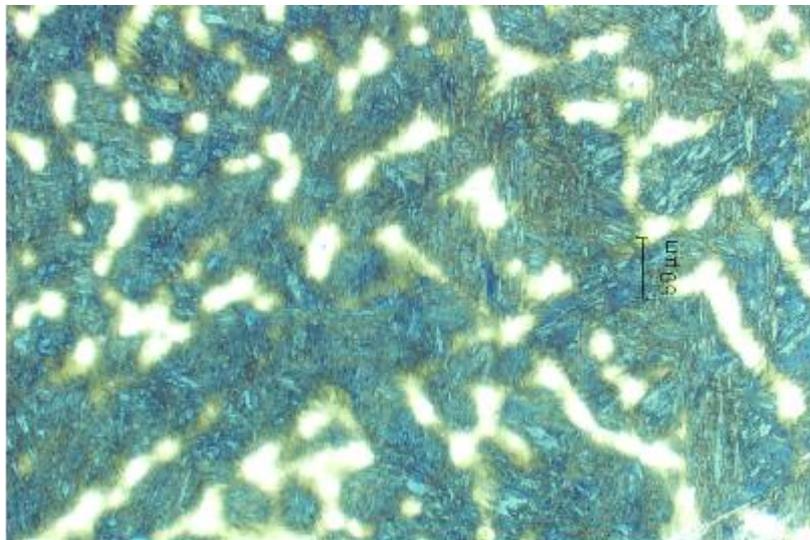
Dureza:

Media: 283 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo el fin del endurecimiento de baja temperatura.

Probeta 10.4. Colada 10 Tratamiento a 250°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 250° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

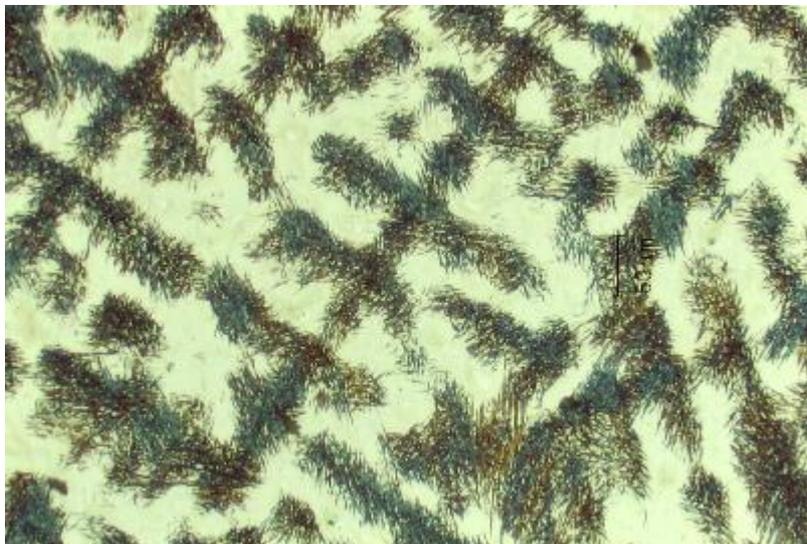
Dureza:

Media: 248 HB

Microestructura:

Martensita revenida baja y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.5. Colada 10 Tratamiento a 300°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 300° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

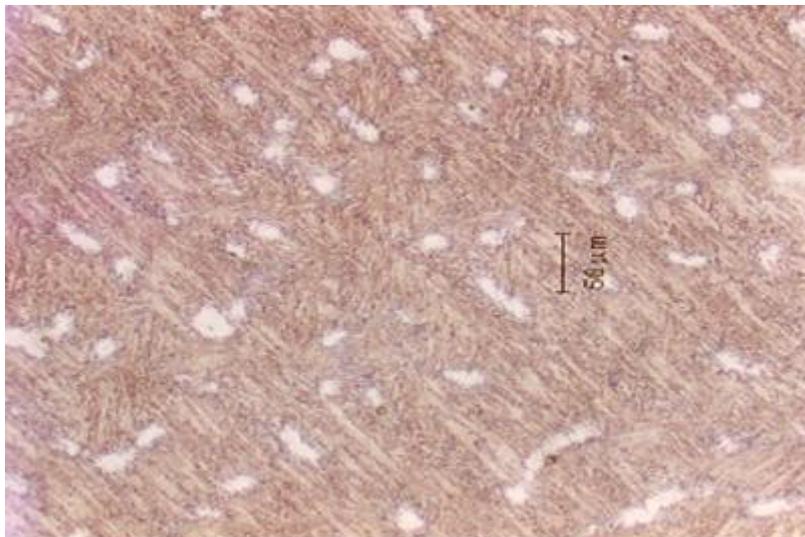
Dureza:

Media: 241 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.6. Colada 10 Tratamiento a 350°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 350° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

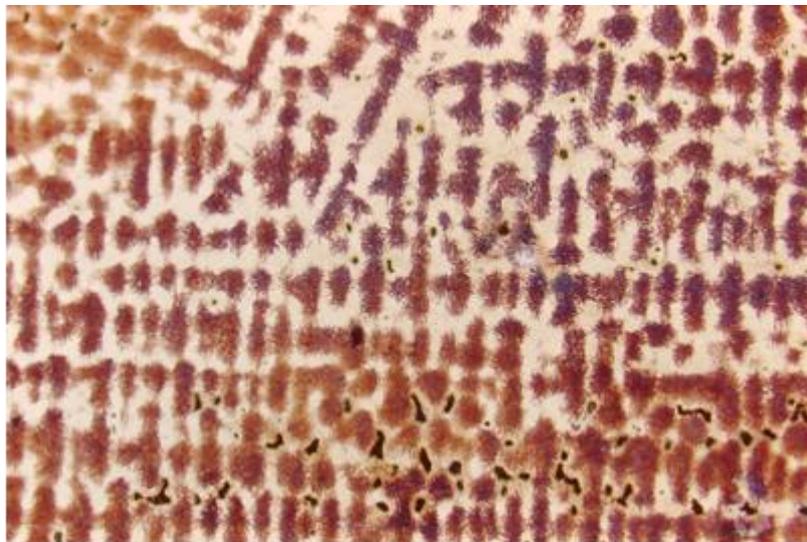
Dureza:

Media: 313 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.7. Colada 10 Tratamiento a 400°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 400° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

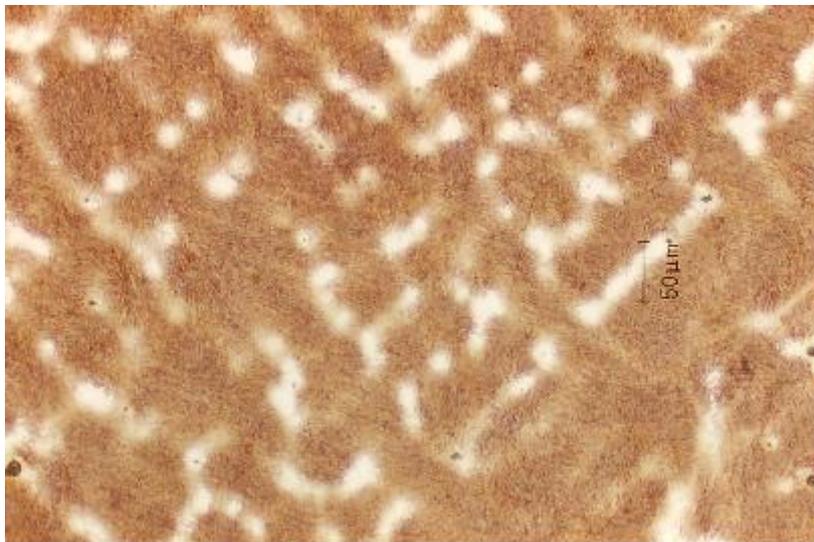
Dureza:

Media: 265 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.8. Colada 10 Tratamiento a 450°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 450° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

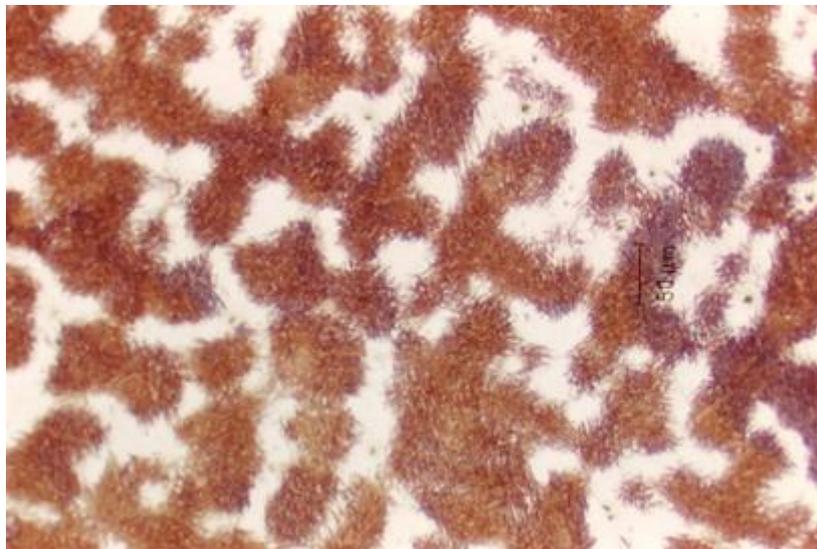
Dureza:

Media: 283 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.9. Colada 10 Tratamiento a 500°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 500° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 254 HB

Microestructura:

Martensita revenida y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.10. Colada 10 Tratamiento a 550°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

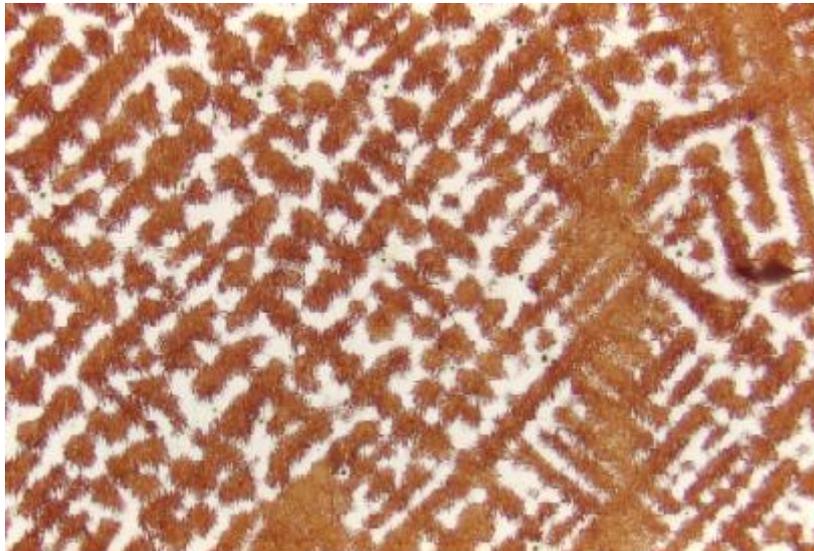
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 550° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 299 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Comienza la aparición de perlitas.

Probeta 10.11. Colada 10 Tratamiento a 600°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 600° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 341 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior salvo la cantidad de perlita creciente.

Probeta 10.12. Colada 10 Tratamiento a 650°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

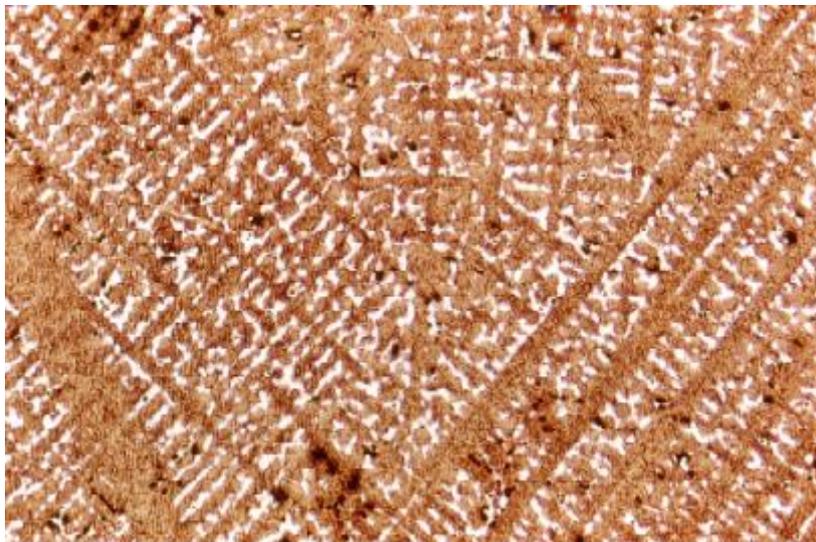
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 650° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 404 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.13. Colada 10 Tratamiento a 700°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 700° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

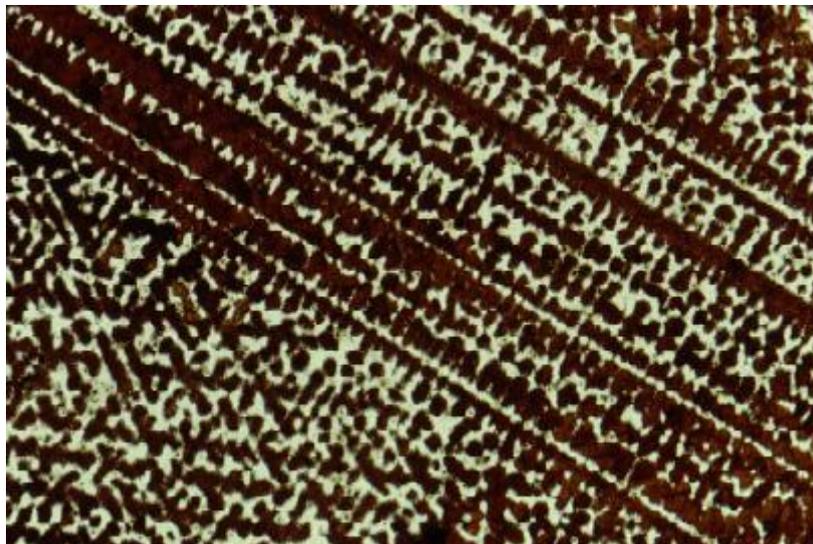
Dureza:

Media: 337 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.14. Colada 10 Tratamiento a 750°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

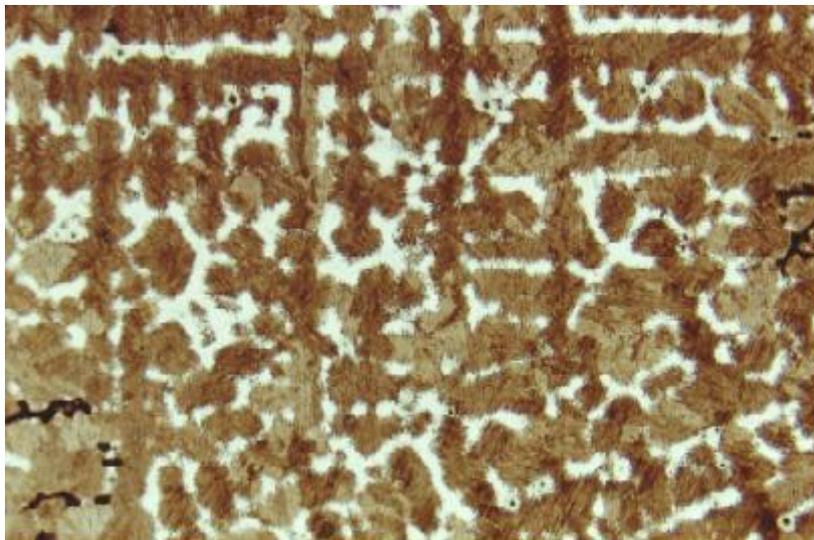
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 750° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 348 HB

Microestructura:

Martensita revenida, perlita y austenita retenida.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

Probeta 10.15. Colada 10 Tratamiento a 800°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 800° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

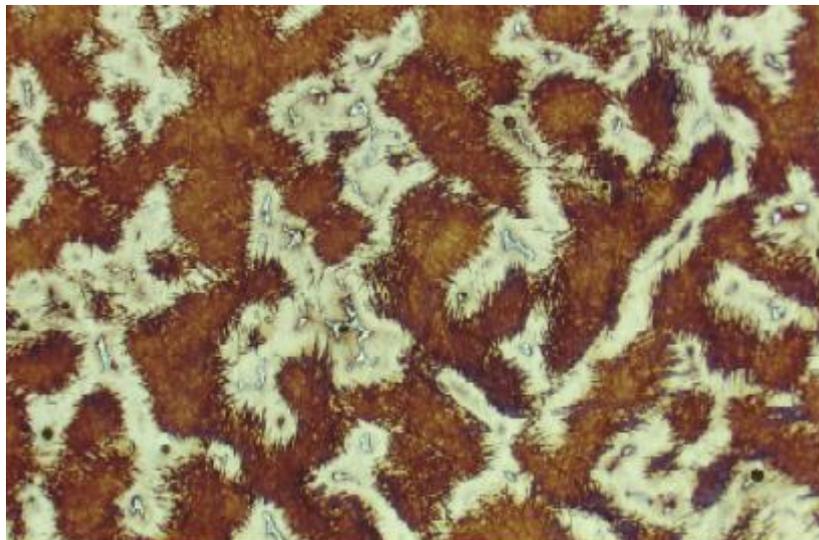
Dureza:

Media: 355 HB

Microestructura:

Martensita revenida y sin revenir, perlita y austenita retenida con carburos.

Imagen:



Comentarios:

Probeta con dureza ligeramente superior a la del hipertemple. La reaustenización parcial deja martensita revenida en algunas zonas y carburos de mayor tamaño en la austenita.

Probeta 10.16. Colada 10 Tratamiento a 850°C.**Composición química (elementos más significativos):**

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

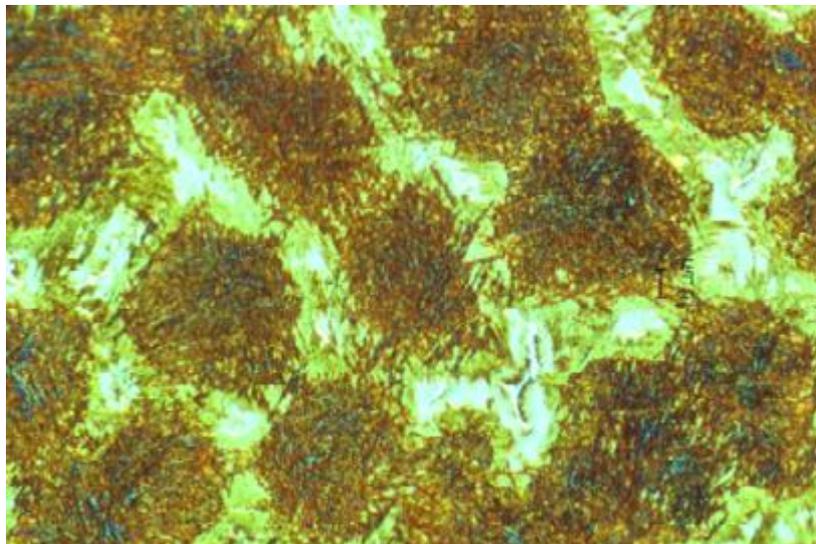
Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 850° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

Dureza:

Media: 355 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida con carburos.

Imagen:**Comentarios:**

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. La probeta ha austenizado completamente templando parcialmente en el enfriamiento.

Probeta 10.17. Colada 10 Tratamiento a 900°C.

Composición química (elementos más significativos):

C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
1,6	6,5	0,5	2	1,75	1,5

Estado de tratamiento:

Hipertemplada a 1100° C durante 2 horas. Enfriamiento en aire tranquilo.
Calentamiento a 900° C durante 1 hora y enfriamiento al aire

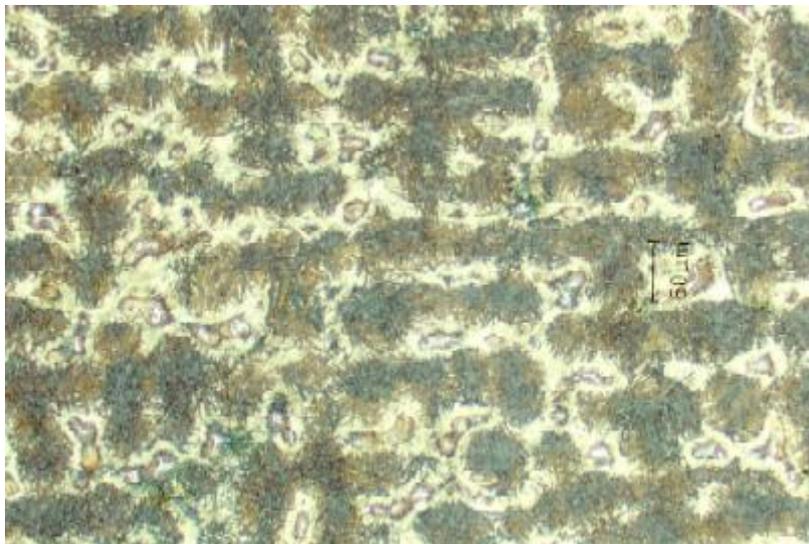
Dureza:

Media: 287 HB

Microestructura:

Martensita y austenita retenida con carburos.

Imagen:

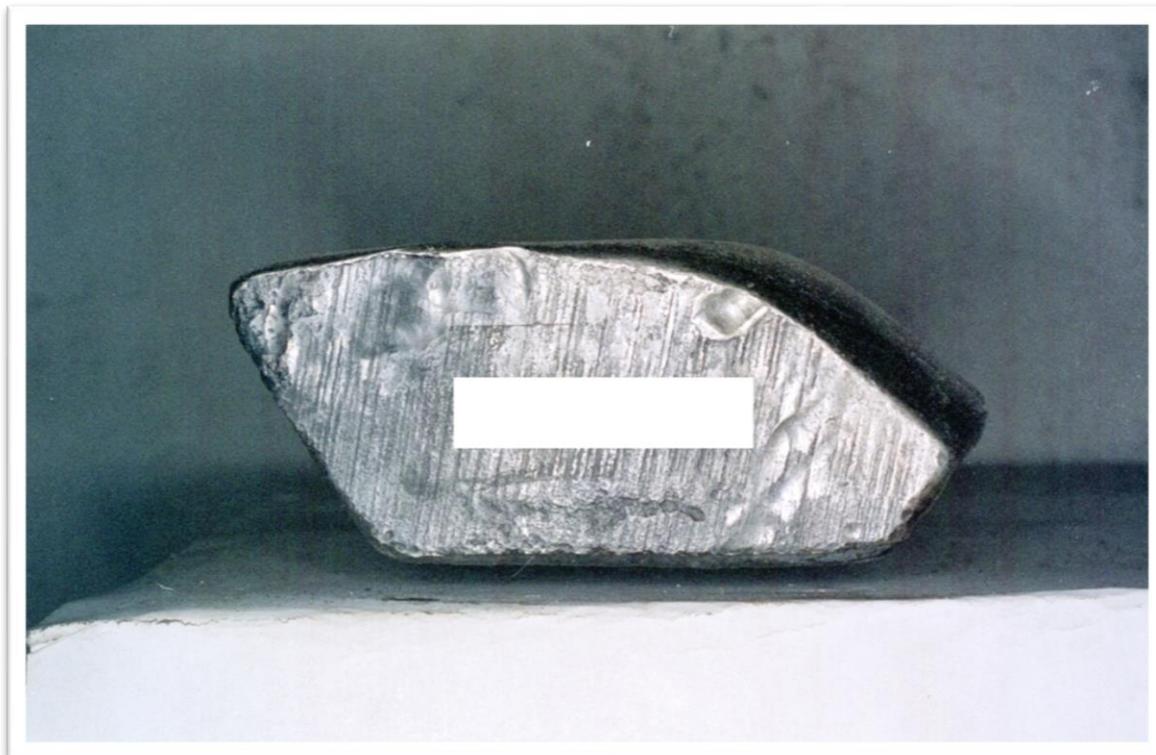


Comentarios:

Probeta con dureza superior a la del hipertemple. Sin cambios significativos con respecto a la probeta anterior.

ANEXO III FOTOGRAFÍAS DE LAS CUÑAS.

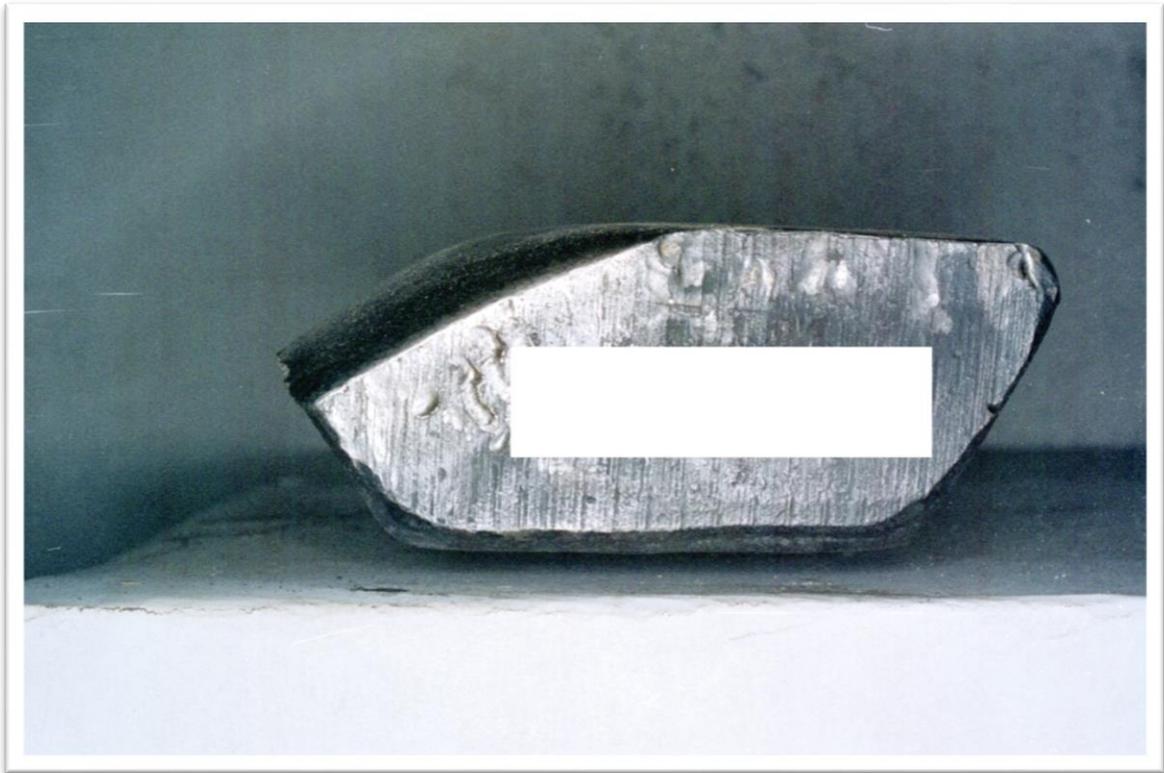
Cuñas colada 0

















Cuñas colada 1

















Cuñas colada 2





