

Nelson Luiz dos Santos

Efeito da re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na
resistência ao impacto do aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield
com alto teor de cromo

São Paulo

2008

Nelson Luiz dos Santos

Efeito da re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na
resistência ao impacto do aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield
com alto teor de cromo

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do curso
de Engenharia

Área de concentração: Engenharia
Metalurgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. André Paulo
Tschiptschin

Co-Orientador: Dr. Ricardo Fuoco

São Paulo

2008

AGRADECIMENTOS

A meus pais que sempre acreditaram em meus planos de vida e sempre representaram um porto seguro para a minha vida.

A todas as pessoas que ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

INDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE.....	22
TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES DE AÇOS AO MANGANÊS AUTENÍTICOS DE TIPO HADFIELD, SEGUNDO A NORMA ASTM A128 ⁽³⁾	26
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO. FORNECIDO PELA METSO MINERALS	46
TABELA 4 - APRESENTA UM RESUMO DAS TEMPERATURA E DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA DOS 5 TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS REALIZADOS.....	50
TABELA 5 - IDENTIFICAÇÃO DAS PLACAS TRATADAS ISOTÉRMICAMENTE A TEMEPRATURA DE 750°C.	51
TABELA 6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO NO ESTADO SOLUBILIZADO.....	57
TABELA 7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS O TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 1 MINUTO NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	60
TABELA 8 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS O TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 2 MINUTOS NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	63
TABELA 9 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS O TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 5 MINUTOS NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	66
TABELA 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS O TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 10 MINUTOS NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	70
TABELA 11 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS O TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	73
TABELA 12 - RESUMO DOS RESULTAS DE ENSAIO DE IMPACTO OBTIDOS COM OS DIFERENTES TEMPOS DE RESISDÊNCIA NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A TEMPERATURA DE 750°C.	74
TABELA 13 - RESUMO DAS TEMPERATURAS E TEMPOS DE RESIDÊNCIA DOS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS REALIZADOS COM AS AMOSTRAS CÚBICAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - VALORES DA TENACIDADE MEDIDA POR ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY COM ENTALHE EM "V". ADAPTADO DE REFERÊNCIA 1.....	23
FIGURA 2 - VALORES RELATIVOS DE DESGASTE POR SULCAMENTO GROSSEIRO ("GOUGING WEAR RATIO") EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO PARA UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM 12%Mn. ADAPTADO DA REFERÊNCIA 1.....	27
FIGURA 3 - VALORES DE LIMITE DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM CORPOR-DE-PROVA DE 25 E 150MM DE ESPESSURA EM AÇO DO TIPO HADFIELD COM 13%Mn-0,6%Si-0,035%P. ADAPTADO DA REFERÊNCIA 1.....	28
FIGURA 4 - VALORES DE ALONGAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM CORPOR-DE- PROVA DE 25 E 150MM DE ESPESSURA EM AÇO DO TIPO HADFIELD COM 13%Mn-0,6%Si- 0,035%P. ADAPTADO DA REFERÊNCIA 1.....	28
FIGURA 5 - COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS Ms MEDIDAS POR DIFERENTES ESTUDOS. ⁽⁷⁾	29
FIGURA 6 - EFEITO DO TEOR DE MANGANÊS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO AUSTENITICOS DO TIPO HADFIELD, SOLUBILIZADO A TEMPERATURA DE 1000°C, COM 1,15%C, 0,65%Si E 0,050%P, ⁽⁷⁾	30
FIGURA 7 - EFEITO DO SILÍCIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD. ⁽⁵⁾	31
FIGURA 8 - EFEITO DA ADIÇÃO DE NÍQUEL,CROMO E MOLIBDÊNIO SOBRE AS PROPRIEDADE MECÂNICAS DOS AÇOS AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD. BARRAS DE TESTE FUNDIDAS NA ESPESSURA DE 25MM NO ESTADO SOLUBILIZADO A 1100°C. ^(4,5,8)	33
FIGURA 9 - EFEITO DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO E DA ESPESSURA DAS PEÇAS NO TAMANHO DOS GRÃOS DE AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD. ^(4,7)	35
FIGURA 10 - EFEITO DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOA AÇOS AUSTENÍTICOS AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD ^(4,5)	36
FIGURA 11 - MICROGRAFIA DE UMA PEÇA FUNDIDA EM AÇO HADFIELD COM ESPESSURA DE 125MM, NO ESTADO BRUTO DE FUNDIÇÃO. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM A PRESENÇA DE CARBONETOS EUTÉTICOS (E), CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS (CC) E COLONIAS DE PERLITA.(P). AUMENTO DE 100X. ATAQUE NITAL 3%.....	37

FIGURA 12 - EFEITO DO RECOBRIMENTO DOS CONTORNOS DE GRÃOS POR PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA CONTÍNUA NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE DIFERENTES CLASSES DE AÇOS AUSTENÍTICOS DO TIPO HADFIELD ^(3, 6, 7)	38
FIGURA 13 - EFEITO DO TEOR DE CARBONO NA TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO DOS AÇOS HADFIELD ^(3, 4)	39
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CURVA TTT TÍPICA DE UMA AÇO AUSTENÍTICO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD. ^(6, 7)	41
FIGURA 15 - EXEMPLOS DE CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS DO TIPO FINO (A) E DO TIPO GROSSO (B). ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO DE 1000x.	42
FIGURA 16 - MICROGRAFIA DE UMA PEÇA COM A PRESENÇA DE RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS DO TIPO FINO E GROSSO. A SETA INDICA O INÍCIO DA PRECIPITAÇÃO DO CARBONETO DO TIPO GROSSO.....	43
FIGURA 17 - FOTOGRAFIAS MOSTRANDO O FORMATO DOS BLOCOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO.....	45
FIGURA 18 - DESENHO MOSTRANDO AS DIMENSÕES DOS BLOCOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO.	46
FIGURA 19 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO POSICIONAMENTO DO CANAL DE ATAQUE, MASSALOTE E REGIÃO DE MENOR POROSIDADE DA PEÇA.....	46
FIGURA 20 - FOTOGRAFIA DA AMOSTRA COM FORMATO CÚBICO.....	47
FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REGIÃO ONDE FORAM EXTRAÍDAS AS PLACAS E SUAS DIMENSÕES.....	48
FIGURA 22 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM TRATAMENTO ISOTÉRMICO.	49
FIGURA 23 - REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES E ESPECIFICAÇÕES DA NORMA ASTM E23	52
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO E POSICIONAMENTO DO CORPOS DE PROVA UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE IMPACTO PADRONIZADOS DO TIPO CHARPY.	52
FIGURA 25 - MOSTRA UMA MICROESTRUTURA CONSTITUÍDA ESSENCIALMENTE DE GRÃOS AUSTENÍTICOS E RECOBERTOS POR DIFERENTES TIPOS DE CARBONETOS PRECIPITADOS DURANTE RESFRIAMENTO LENDO NO MOLDE. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO DE 200x....	54
FIGURA 26 - MOSTRA UMA MICROESTRUTURA CONSTITUÍDA ESSENCIALMENTE DE GRÃOS AUSTENÍTICOS E RECOBERTOS POR DIFERENTES TIPOS DE CARBONETOS PRECIPITADOS DURANTE RESFRIAMENTO LENDO NO MOLDE CARBONETO EUTÉTICO (E), CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS (CC) E COLÔNIAS DE “PERLITA” (P). ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO DE 400x.	54

FIGURA 27 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA LIVRES DE RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	56
FIGURA 28 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO. MOSTRA OS CONTORNOS DE GRÃOS LIVRES DE RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.....	56
FIGURA 29 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO SOLUBILIZADO APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE O ALONGAMENTO DOS GRÃOS DE AUSTENITA E A PRESENÇA DE LINHAS DE DEFORMAÇÃO GERADOS DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.	57
FIGURA 30 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA SEM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	59
FIGURA 31 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM A PRESENÇA DE CARBONETOS RE-PRECIPITADOS NA FORMA DESCONTÍNUA AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.....	59
FIGURA 32 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. O DETALHE REPRESENTA UM CARBONETO PRECIPITADO NO CONTORNO DE GRÃO DA AUSTENITA NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 1000X.....	60
FIGURA 33 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO DE 1 MINUTO A 750°C, APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE O ALONGAMENTO DOS GRÃOS DE AUSTENITA E A PRESENÇA DE LINHAS DE DEFORMAÇÃO GERADOS DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.	61
FIGURA 34 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 2 MINUTOS. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	62
FIGURA 35 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 2 MINUTOS. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM A PRESENÇA DE CARBONETOS RE-PRECIPITADOS NA FORMA	

DESCONTÍNUA AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.....	62
FIGURA 36 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 2 MINUTOS. UM MAIOR AUMENTO REVELA GRÃOS DE AUSTENITA COM A PRESENÇA DE CARBONETOS RE-PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS (A). APRESENTA UMA PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUANA (B). ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 1000X.	63
FIGURA 37 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO DE 2 MINUTOS A 750°C, APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE O ALONGAMENTO DOS GRÃOS DE AUSTENITA E A PRESENÇA DE LINHAS DE DEFORMAÇÃO GERADOS DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.	64
FIGURA 38 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	65
FIGURA 39 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. GRÃOS DE AUSTENITA APRESENTAM RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS COM UM ASPECTO CONTÍNUO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.	65
FIGURA 40 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. OBSERVA-SE UMA FORMA CONTÍNUA DE RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 1000X.	66
FIGURA 41 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO DE 5 MINUTOS A 750°C, APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE UMA FRATURA MAIS FACEADA QUE ACOMPANHA OS FORMATO DOS GRÃOS AUSTENÍTICOS. EM DETALHE A TRINCA “CAMINHANDO” PREFERENCIALMENTE PELOS CONTORNOS DE GRÃOS DA MICROESTRUTURA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.	67
FIGURA 42 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 10 MINUTOS. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	68
FIGURA 43 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 10 MINUTOS. GRÃOS DE	

AUSTENITA APRESENTAM RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS COM UM ASPECTO CONTÍNUO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.....	69
FIGURA 44 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 10 MINUTOS. OBSERVA-SE UM RECOBRIMENTO COMPLETO DOS CONTORNOS DE GRÃOS DE AUSTENITA PELA RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 1000X.....	69
FIGURA 45 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO DE 10 MINUTOS A 750°C, APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE UMA FRATURA MAIS FACEADA QUE ACOMPANHA OS FORMATO DOS GRÃOS AUSTENÍTICOS. EM DETALHE A TRINCA “CAMINHANDO” PREFERENCIALMENTE PELA REGIÃO DE CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.....	70
FIGURA 46 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 20 MINUTOS. APRESENTA GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	71
FIGURA 47 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 20 MINUTOS. GRÃOS DE AUSTENITA APRESENTAM RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS AO LONGO DOS CONTORNOS DE GRÃOS COM UM ASPECTO CONTÍNUO. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 500X.....	72
FIGURA 48 - MICROESTRUTURA DE UM AÇO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO MANTIDO NA TEMPERATURA DE 750°C PELO TEMPO DE 20 MINUTOS. OBSERVA-SE UM RECOBRIMENTO COMPLETO DOS CONTORNOS DE GRÃOS DE AUSTENITA PELA RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 1000X.....	72
FIGURA 49 - MICROGRAFIA DO CORTE LONGITUDINAL DE UMA CORPO DE PROVA, NO ESTADO DE 20 MINUTOS A 750°C, APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO CHARPY. NOTA-SE UMA FRATURA QUE ACOMPANHA OS FORMATO DOS GRÃOS AUSTENÍTICOS QUE PROMOVE O ARRANCAVAMENTO DOS GRÃOS. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 125X.....	73
FIGURA 50 - GRÁFICO QUE RELACIONA A ENERGIA ABSORVIDA DE IMPACTO COM O TEMPO DE RESIDÊNCIA NO TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.	75
FIGURA 51 - ASPECTO DA FRATURA DE UM CORPO DE PROVA COM TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 1 MINUTO A 750°C E 204J DE ENERGIA ABSORVIDA. (MEV) AUMENTO 20X.....	76
FIGURA 52 - ASPECTO DA FRATURA DE UM CORPO DE PROVA COM TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 1 MINUTO A 750°C E 204J DE ENERGIA ABSORVIDA. (MEV) AUMENTO 100X.....	77

FIGURA 53 - ASPECTO DA FRATURA DE UM CORPO DE PROVA COM TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS A 750°C E 10J DE ENERGIA ABSORVIDA. (MEV) AUMENTO 20X.....	78
FIGURA 54 - ASPECTO DA FRATURA DE UM CORPO DE PROVA COM TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS A 750°C E 10J DE ENERGIA ABSORVIDA. (MEV) AUMENTO 100X.....	79
FIGURA 55 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 190J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 2 MINUTOS A 750°C. APRESENTA CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DECONTÍNUA. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 2500X.....	80
FIGURA 56 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 190J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 2 MINUTOS A 750°C. APRESENTA CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DECONTÍNUA. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 6500X.....	81
FIGURA 57 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 190J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 2 MINUTOS A 750°C. APRESENTA CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DECONTÍNUA E A MORFOLOGIA DENDRÍTICA DOS CARBONETOS. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 8000X.....	81
FIGURA 58 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 10J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS A 750°C. APRESENTA CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 1000X.....	82
FIGURA 59 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 10J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS A 750°C. APRESENTA CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA E ENVOLVEM COMPLETAMENTE OS GRÃOS DE AUSTENITA.. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 2500X.....	83
FIGURA 60 - MICROESTRUTURA DE UM CORPO DE PROVA COM VALOR DE ENERGIA DE IMPACTO DE 10J E TEMPO DE RESIDÊNCIA DE 20 MINUTOS A 750°C. APRESENTA O DETALHE DA MORFOLOGIA DENDRÍTICA DOS CARBONETOS PRECIPITADOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA CONTÍNUA. ATAQUE PROFUNDO. (MEV) AUMENTO 10000X.	83
FIGURA 61 - CURVA TTT DO AÇO AUSTENÍTICO AO MANGANÊS DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO.	85
FIGURA 62 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 450°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. NOTA-SE A PRESENÇA	

DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	88
FIGURA 63 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 450°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	88
FIGURA 64 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 450°C PELO TEMPO DE 15 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	89
FIGURA 65 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 450°C PELO TEMPO DE 40 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	89
FIGURA 66 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 600°C PELO TEMPO DE 2 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	90
FIGURA 67 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 600°C PELO TEMPO DE 4 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	90
FIGURA 68 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 600°C PELO TEMPO DE 8 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA E DE CARBONETOS DE FROMATO ACICULAR. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	91
FIGURA 69 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 600°C PELO TEMPO DE 15 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	91
FIGURA 70 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 600°C PELO TEMPO DE 40 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS	

DE GRÃOS QUE APARENTAM CRESCER EM DIREÇÃO DA MATRIZ AUSTENÍTICA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	92
FIGURA 71 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	93
FIGURA 72 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 2 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA DESCONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.....	93
FIGURA 73 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA, PRATICAMENTE, CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X. 94	94
FIGURA 74 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 10 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FORMA, PRATICAMENTE, CONTÍNUA.. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X.	94
FIGURA 75 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 20 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS QUE FORMAM UMA REDE CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X..... 95	95
FIGURA 76 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C PELO TEMPO DE 35 MINUTOS. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS QUE FORMAM UMA REDE CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X..... 95	95
FIGURA 77 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 850°C PELO TEMPO DE 1 MINUTO. NOTA-SE A PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA LIVRES DE PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITA 3%. AUMENTO 250X.	96
FIGURA 78 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 850°C PELO TEMPO DE 5 MINUTOS. NOTA-SE A	

PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA LIVRES DE PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM
CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITA 3%. AUMENTO 250X. 96

FIGURA 79 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO
APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 850°C PELO TEMPO DE 15 MINUTOS. NOTA-SE A
PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA LIVRES DE PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM
CONTORNOS DE GRÃOS. ATAQUE NITA 3%. AUMENTO 250X. 97

FIGURA 80 - MICROESTRUTURA DE UMA AÇO DO TIPO HADFIELD COM ALTO TEOR DE CROMO
APÓS TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 850°C PELO TEMPO DE 30 MINUTOS. NOTA-SE A
PRESENÇA DE GRÃOS DE AUSTENITA COM PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS
DE GRÃOS NA FORMA, PRATICAMENTE, CONTÍNUA. ATAQUE NITAL 3%. AUMENTO 250X. 97

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	22
1) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
1.1) ELEMENTOS DE LIGA E PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	26
1.2) FUNDIÇÃO	35
1.3) TRATAMENTO TÉRMICO	37
1.4) RE-PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS	40
2) MATERIAIS E MÉTODOS	45
2.1) MATERIAIS.....	45
2.2) RETIRADA DE AMOSTRAS	47
2.3) TRATAMENTO ISOTÉRMICO	48
2.4) ENSAIO CHARPY.....	51
2.5) PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA	52
3.) RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1) AMOSTRA BRUTA DE FUNDIÇÃO	54
3.2) AMOSTRA NO ESTADO SOLUBILIZADO	55
3.3) TRATAMENTO ISOTÉRMICO A 750°C.....	58
3.3.1) <i>Tempo de residência de 1 minuto</i>	58
3.3.2) <i>Tempo de residência de 2 minutos</i>	61
3.3.3) <i>Tempo de residência de 5 minutos</i>	64
3.3.4) <i>Tempo de residência de 10 minutos</i>	68
3.3.5) <i>Tempo de residência de 20 minutos</i>	71
3.4) MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	75
3.4.1 MECANISMO DE FRATURA.....	76
3.4.2) MICROESTRUTURA	80
4) CONCLUSÕES	84
5) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
6) ANEXO A.....	87

Resumo

Os aços do tipo Hadfield apresentam uma característica de elevada tenacidade. Um problema que afeta a tenacidade destes materiais é a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, que diminui sensivelmente a resistência ao impacto destes aços. Existem diferentes níveis de re-precipitação destes carbonetos, que de acordo com a literatura, podem ou não prejudicar a resistência ao impacto dos aços Hadfield. O presente trabalho tem o intuito de relacionar os diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos e seus respectivos efeitos na resistência ao impacto no aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo. Utilizou-se de tratamentos isotérmicos para a reprodução diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, ensaios de impactos padronizados do tipo Charpy (norma ASTM E23) - para avaliação da resistência ao impacto. A microscopia óptica (M.O.) e a microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) foram utilizadas para a caracterização das microestruturas obtidas após tratamento isotérmico e explicar o efeito da re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos sobre a resistência ao impacto dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo.

Palavras-chave: aço manganês, Hadfield, precipitação de carbonetos, ensaio de impacto

Abstract

The principal mechanical property of austenitic manganese steels is high toughness. That characteristic of this materials is affected by grain boundary carbides precipitation, which reduces the material toughness at a significant level. There are some different levels of grain boundary carbides precipitation, which can or cannot cause loss of high toughness at Hadfield's steels. This paper has the intention to connect some different levels of grain boundary carbides precipitation with their respective effects in the impact toughness of austenitic manganese steel with high chrome contents. Isothermal treatments reproduce some different levels of grain boundary carbides precipitation. Charpy impact tests (standard ASTM E23) were used for evaluation of impact toughness. Optical microscopy and the electronic microscopy were used to characterize the microstructure of these different levels of grain boundary carbides.

Keywords: manganese steel, Hadfield, grain boundary carbides precipitation, impact toughness

INTRODUÇÃO

O aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield é um material utilizado em aplicações em que envolvem, ao mesmo tempo, resistência ao desgaste e resistência ao impacto.

Existem diferentes materiais, que são utilizados em peças de resistência ao desgaste, para aplicação industrial. Uma classificação ^(1,2) das ligas utilizadas nesta função são apresentadas na Tabela 1, a seguir..

Tabela 1 - Classificação dos materiais de resistência ao desgaste.

MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO
1	Aços baixa liga martensíticos com baixo carbono (0,3%C)
2	Aços baixa liga martensíticos com médio carbono (0,4%C)
3	Aços períticos com elevado carbono (0,6 a 0,8%C)
4	Ferros fundidos branco de alto cromo
5	Aços com baixo teor de manganês (Clímax lean Mn steel - 5 a 7%Mn)
6	Aços ao manganês do tipo Hadfield (11 a 14%Mn)

Os aços ao manganês do tipo Hadfield apresentam uma resistência a abrasão baixa quando comparado com os demais materiais utilizados para esta aplicação. A principal característica mecânica de aço Hadfield, que o diferencia dos demais materiais utilizados para resistência ao desgaste, é a sua elevada tenacidade ^(1,2).

Uma comparação entre os resultados típicos de resistência ao impacto, em testes do tipo Charpy, dos diferentes materiais utilizados na em aplicações envolvendo abrasão ⁽¹⁾ são apresentados na Figura 1, a seguir.

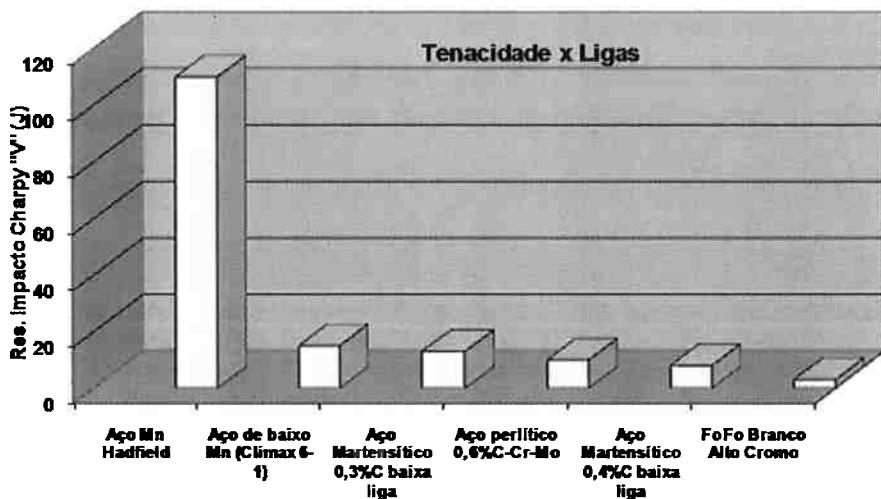


Figura 1 - Valores da tenacidade medida por ensaios de impacto Charpy com entalhe em "V".
Adaptado de referência 1.

Assim, observa-se que os aços ao manganês do tipo Hadfield são especificados pela sua elevada tenacidade^(1,3 e 4).

Os aços ao manganês apresentam uma matriz austenítica de elevada tenacidade, decorrente do tratamento térmico de solubilização. No estado solubilizado estes aços apresentam um limite de escoamento na ordem de 450 MPa, um nível de dureza em torno de 200HB e portanto uma baixa resistência à abrasão.

Entretanto, quando os componentes são submetidos a aplicações que envolvem uma elevada taxa de deformação, ocorre o encruamento superficial. Tal fato eleva sua dureza superficial a ordem de 650HB, aumentando a resistência à abrasão deste material. Vale ressaltar que, uma vez desgastada, a camada superficial é renovada pela formação de novas camadas, conforme ocorram novas deformações da superfície.

Logo, os componentes fabricados em aços ao manganês do tipo Hadfield apresentam uma fina camada superficial de elevada dureza e um núcleo de grãos austeníticos que proporcionam uma elevada tenacidade a este aço.

A aplicação destes aços é recomendada em situações onde ocorre predominância de desgaste por sulcamento grosseiro ("macroscopic gouging

abrasion”), capaz de promover uma deformação e encruamento superficial do material através da formação de sulcos profundos, visíveis a olho nu⁽²⁾.

A elevada tenacidade e formação de uma fina camada superficial, de elevada resistência à abrasão, são determinantes para o uso industrial de aços ao manganês do tipo Hadfield em equipamentos, de grandes dimensões, de britagem primária de minérios (mandíbulas e giratórios), martelos de fragmentação de minérios e sucatas, desvios e cruzamentos ferroviários, etc.

Um problema enfrentado pela indústria que fabrica componentes em aço do tipo Hadfield é a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos^(1, 3, 4, 5, 6). Tal fato ocorre durante o resfriamento após a etapa do tratamento térmico de solubilização.

A baixa condutividade térmica destes aços limita a extração de calor, pois o resfriamento do interior da peça é limitado pela velocidade de saída do calor do centro da peça (condutividade térmica do aço) ao invés da velocidade de extração de calor pelo meio de resfriamento (capacidade térmica da água). Assim, a velocidade de resfriamento é determinada pela espessura do componente e a fabricação de peças espessas é limitada pela re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos.

A re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos ocorre na faixa de temperatura de 900 a 400°C^(1, 4, 5, 6), temperaturas onde a austenita e a cementita são as fases estáveis. A presença de carbonetos precipitados envolta dos grãos austeníticos, na microestrutura das peças, pode gerar uma rede contínua destes carbonetos que apresentará uma queda significativa na resistência ao impacto dos aços Hadfield⁽⁶⁾.

Um fato importante é determinar quando a presença de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos é prejudicial à tenacidade dos aços do tipo Hadfield.

Assim, o presente trabalho tem o intuito de avaliar a resistência ao impacto, dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo, e relacionar tais valores de resistência ao impacto com a presença de diferentes níveis

de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, na microestrutura destes aços.

1) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1) Elementos de liga e propriedades mecânicas

O aço ao manganês foi descoberto por Sir Robert Hadfield em 1882 e era constituído essencialmente por 1,2%C e 12%Mn ^(1,3). As especificações da composição química das diversas classes deste aço são apresentadas na norma ASTM A128 que é reproduzida na Tabela 1, a baixo.

Tabela 2 - Especificações de aços ao manganês autênticos de tipo Hadfield, segundo a norma ASTM A128 ⁽³⁾.

Grau	C(%)	Mn(%)	Cr(%)	Mo(%)	Ni(%)	Si(%)	P(%)
A	1,05 - 1,35	11,0 min	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-1	0,9 - 1,05	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-2	1,05 - 1,2	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-3	1,12 - 1,28	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-4	1,2 - 1,35	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
C	1,05 - 1,35	11,5 - 14,0	1,5 - 2,5	-	-	1,00 max	0,07 max
D	0,7 - 1,3	11,5 - 14,0	-	-	3,0 - 4,0	1,00 max	0,07 max
E-1	0,7 - 1,3	11,5 - 14,0	-	0,9 - 1,2	-	1,00 max	0,07 max
E-2	1,05 - 1,45	11,5 - 14,0	-	1,8 - 2,1	-	1,00 max	0,07 max
F	1,05 - 1,35	6,0 - 8,0	-	0,9 - 1,2	-	1,00 max	0,07 max

É interessante notar que a formulação original desenvolvida em 1882 persiste até hoje como uma das mais utilizadas. De maneira geral, modificações impostas à composição química destes aços visando aumentar sua resistência a abrasão resultam na redução drástica da tenacidade da liga, impossibilitando sua aplicação industrial ⁽¹⁾.

O efeito da modificação nos teores dos principais elementos de liga presentes nos aços Hadfield, são apresentados a seguir.

Teor de carbono: O carbono apresenta uma forte influência sobre as propriedades mecânicas destes aços. Primeiramente, o carbono junto com o manganês são elementos que estabilizam a fase austenítica e contribuem decisivamente para o aumento da capacidade de encruamento durante o trabalho ^(1,3).

Existe uma correlação direta entre o aumento do teor de carbono e o aumento da resistência ao desgaste, como pode ser observada na Figura 2 a seguir.

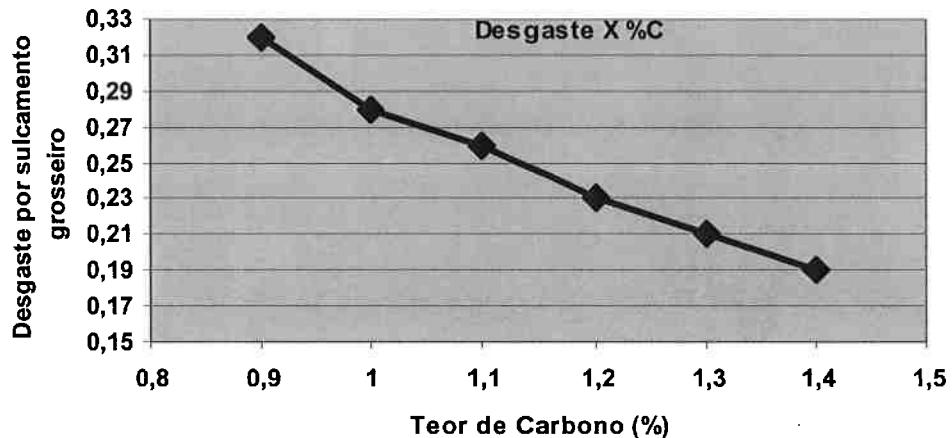


Figura 2 - Valores relativos de desgaste por sulcamento grosso ("gouging wear ratio") em função do teor de carbono para um aço ao manganês do tipo Hadfield com 12%Mn. Adaptado da referência 1.

A maior resistência ao desgaste devido ao aumento do teor de carbono, como apresentado na Figura 2, leva a especificação de aços do tipo Hadfield com alto carbono. Entretanto, a utilização deste recurso garante apenas uma elevada tenacidade para componentes de pouca espessura, de rápida solidificação. As baixas velocidades de solidificação destes aços, em peças grossas, limitam a sua ductilidade e tenacidade ⁽⁴⁾. Logo, um importante ponto na produção de componentes de aços do tipo Hadfield é o balanço entre a porcentagem de carbono e a espessura da peça a ser produzida, garantindo uma elevada tenacidade na produção de peças grossas. A variação dos valores de limite de escoamento e de alongamento com o teor de carbono, para corpos-de-prova fundidos na espessura de 25mm e 150mm, são mostrados nas Figuras 3 e 4, respectivamente ^(1, 4).

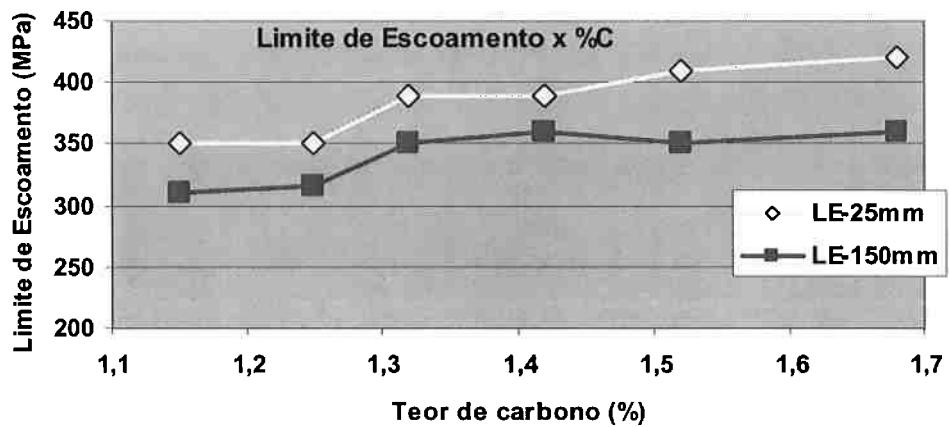


Figura 3 - Valores de limite de escoamento em função do teor de carbono em corpor-de-prova de 25 e 150mm de espessura em aço do tipo Hadfield com 13% Mn-0,6% Si-0,035% P. Adaptado da referência 1.

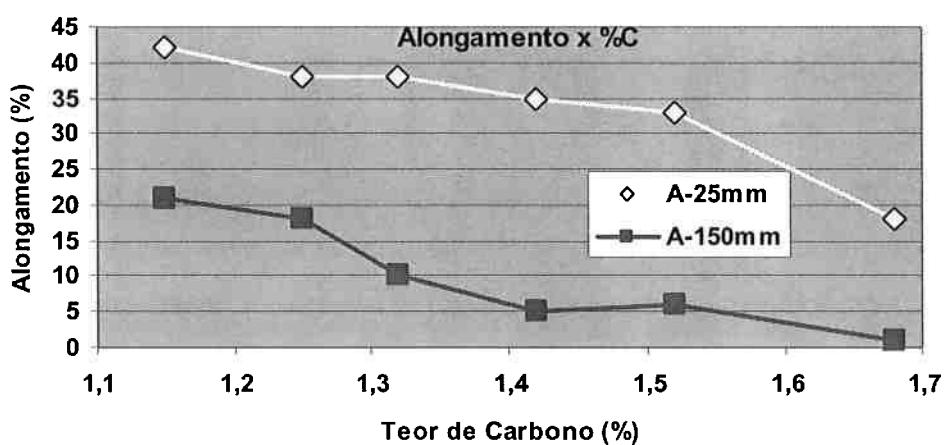


Figura 4 - Valores de alongamento em função do teor de carbono em corpor-de-prova de 25 e 150mm de espessura em aço do tipo Hadfield com 13% Mn-0,6% Si-0,035% P. Adaptado da referência 1.

Aços com 1,15% C apresentam um redução no alongamento por volta de 50% com o aumento da espessura dos corpos-de-prova de 25 para 150mm. Nota-se que para corpos-de-prova finos (25mm de espessura), o aumento do teor de carbono

melhora o limite de escoamento sem causar grandes perdas de ductilidade até teores de carbono de 1,5%. Porem, para corpos-de-prova grossos (150mm de espessura), o aumento do teor de carbono causa um acentuado efeito de diminuição da ductilidade, limitando os teores de carbono a valores máximos de 1,25%.

Portanto, é importante que melhorias no desempenho mecânico e de desgaste nos aços ao manganês do tipo Hadfield sejam realizados em corpos-de-prova com espessuras compatíveis com as peças a serem fabricadas industrialmente.

Teor de Manganês: O manganês, juntamente com o carbono, são elementos que mantém a estabilidade da fase austenítica até temperatura ambiente, durante a etapa de resfriamento. Existem valores mínimos de teores de carbono e manganês que garantem a estabilidade da austenita durante o resfriamento severo a temperatura ambiente, a Figura 5 apresentada a seguir mostra os valores encontrados por estudos de diferentes autores^(7, 8, 9, 10).

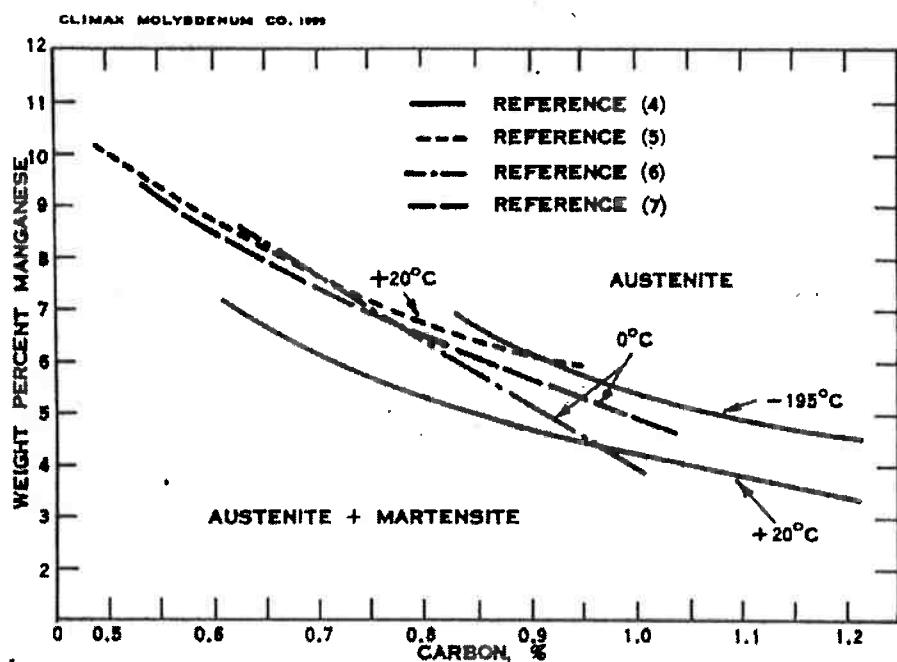


Figura 5 - Comparação das temperaturas M_s medidas por diferentes estudos.⁽⁷⁾

A Figura 5 mostra que um aço temperado, com teores de 1.2% de carbono e 6% de manganês, apresenta uma matriz austenítica quando resfriado até temperatura ambiente.

A característica de apresentar uma elevada ductilidade e tenacidade da matriz austenítica é obtida com um excesso de manganês (10% Mn)^(7, 8). Este fato é evidenciado na Figura 6, que apresenta os valores das propriedades mecânicas de um aço contendo 1.2% de carbono e com a variação dos teores de manganês (5,5 a 13% Mn), exibida a seguir.

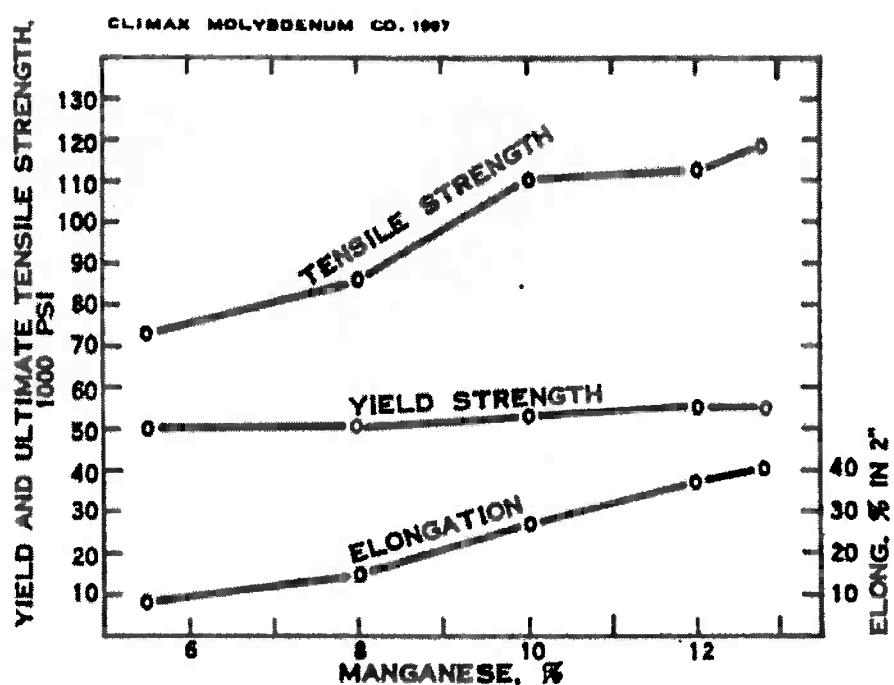


Figura 6 - Efeito do teor de manganês sobre as propriedades mecânicas de aço austeníticos do tipo Hadfield, solubilizado a temperatura de 1000°C, com 1,15% C, 0,65% Si e 0,050% P, ⁽⁷⁾.

Os componentes fundidos de aços ao manganês do tipo Hadfield são produzidos comercialmente com o teor de manganês na faixa de 11 a 14%, ou seja, uma razão manganês-carbono por volta de dez para um (razão 10/1). Entretanto, a necessidade de uma especificação da razão manganês-carbono é questionada por alguns autores ^(5, 7).

Teor de Silício: O silício é, normalmente, adicionado em quantidades suficientes para promover a desoxidação do banho de metal, durante a etapa de preparação do mesmo ^(5, 7).

Alguns estudos mostram a influência do teor de silício nas propriedades mecânicas dos aços ao manganês do tipo Hadfield, para teores maiores que 2,2% de silício apresentam uma diminuição acentuada nas propriedades mecânicas destes aços, como apresentado na Figura 7 a seguir.

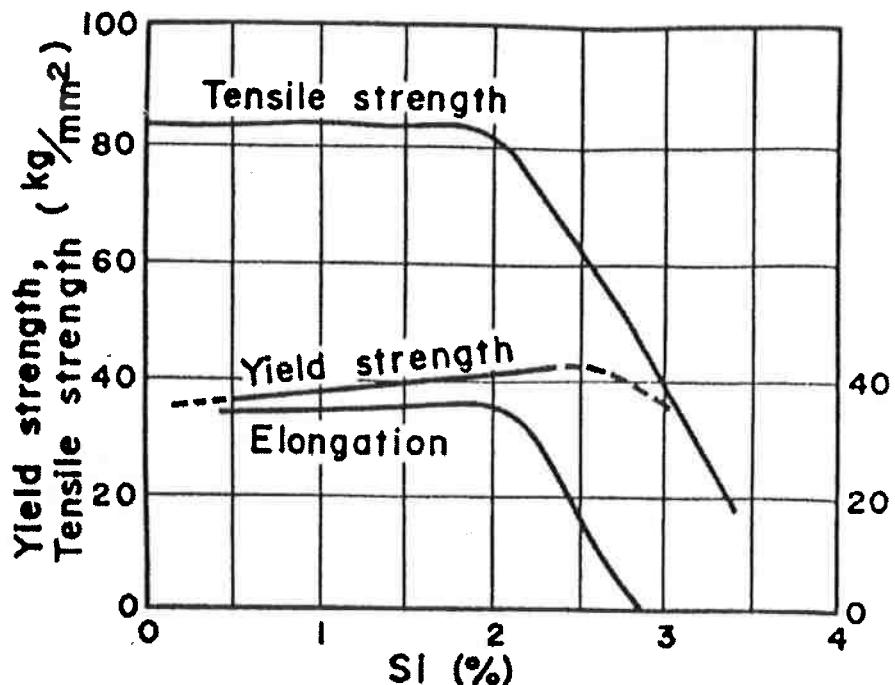


Figura 7 - Efeito do silício nas propriedades mecânicas dos aços ao manganês do tipo Hadfield.⁽⁵⁾

O estudo de alguns autores mostra que elevados valores de silício tendem a diminuir a solubilidade do carbono na matriz austenítica, precipitando o carbono na forma de carbonetos massivos^(8, 9).

Assim, para obter um valor desejável de resistência ao desgaste é necessário um elevado teor de carbono em solução na matriz austenítica,. A presença de elevados teores de silício tem efeito prejudicial na solubilidade do carbono dentro da matriz austenítica^(7, 8, 9).

Teor de Cromo: O cromo promove um aumento das propriedades mecânicas dos aços do tipo Hadfield. A adição de teores de cromo, até a ordem de 2,5%, apresenta um incremento no limite de escoamento e na dureza destes aços^(4, 5, 8, 9). Assim, o cromo é adicionado para aumentar a resistência ao desgaste dos aços austeníticos ao manganês.

Um fator importante a se destacar é que a adição de cromo tende a acelerar a formação de redes contínuas de carbonetos em contornos de grãos (cromo é um elemento formado de carbonetos), tal fato é prejudicial à ductilidade dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield ^(1, 4, 5, 7).

Teor de Molibdênio: O molibdênio é o principal elemento de liga dos aços Hadfield, adições de molibdênio apresentam três vantagens ^(1, 3, 5, 7), a saber:

1. Aumento do limite de escoamento da liga, permitindo a utilização de menores teores de carbono em componentes sem prejudicar a resistência mecânica dos mesmos;
2. Aumento das propriedades mecânicas no estado bruto de fundição, facilitando o manuseio das peças dentro da fundição, cortes de canais e massalotes, etc;
3. Aumento da “temperabilidade” dos aços Hadfield, atrasando a precipitação de carbonetos em contornos de grãos de austenita durante o resfriamento após o tratamento térmico de solubilização;

Uma desvantagem decorrente da adição de molibdênio aos aços Hadfield é o seu elevado custo, assim é importante a utilização deste elemento de acordo com as necessidades de cada peça produzida.

Teor de Níquel: O níquel não apresenta alterações significativas nos valores das propriedades mecânicas dos aços ao manganês do tipo Hadfield ^(5, 7).

A adição de níquel aos aços do tipo Hadfield apresentam duas vantagens ^(1, 5, 7), a saber.

1. Aumento da resistência ao impacto em condições de baixa temperatura da liga, possibilitando o uso de componentes em regiões de baixa temperatura, e assim mantendo sua elevada tenacidade nestas condições.
2. Aumento da “soldabilidade” dos aços Hadfield, devido a sua influência na estabilidade da fase austenítica durante os processos de soldagem.

Assim, a maior contribuição da adição de níquel aos aços do tipo Hadfield é a estabilização da fase autenítica, fato que pode ser alcançado com o aumento do teor de manganês a composição química da liga e com um custo muito menor.

Um resumo do efeito da adição dos elementos cromo, níquel e molibdênio nas propriedades mecânicas dos aços austeníticos do tipo Hadfield é apresentado na Figura 8, a baixo.

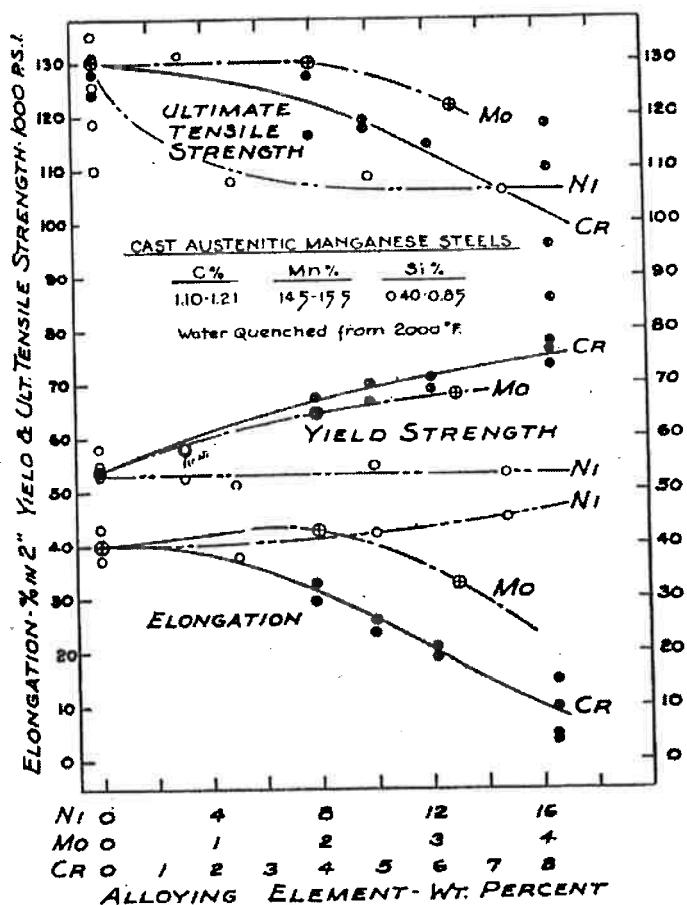


Figura 8 - Efeito da adição de níquel, cromo e molibdênio sobre as propriedades mecânicas dos aços ao Manganês do tipo Hadfield. Barras de teste fundidas na espessura de 25mm no estado solubilizado a 1100°C. ^(4,5,8)

Teor de Fósforo: O fósforo é a principal impureza dos aços Hadfield, menos pelo fato de sua presença diminuir as propriedades mecânicas e mais por causar trincas durante a fundição e tratamento térmico da peça ^(1, 4, 7).

Pois durante a solidificação do componente fundido, ocorre a segregação dos elementos de liga, como o carbono, manganês, fósforo, cromo e molibdênio. Assim, ocorrerá a formação de eutéticos de baixo ponto de fusão na região de contornos de grãos e isso aumenta o risco de trincas de solidificação e de ocorrer a fusão incipiente dos contornos de grãos durante o tratamento térmico de solubilização.

1.2) Fundição

A etapa de fundição influencia nas propriedades mecânicas dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield.

O tamanho de grão da microestrutura austenítica tem uma relação inversa com a resistência mecânica da peça e resistência ao desgaste, ou seja, maiores valores de tamanho de grão geram menores valores de resistência mecânica e de desgaste. A velocidade de solidificação do metal líquido dentro do molde controla o tamanho de grão da microestrutura austenítica final da peça produzida

Existem dois fatores importantes que determinam a velocidade de solidificação das peças fundidas em aços Hadfield, a saber.

1. Espessura da peça
2. Temperatura de vazamento

O efeito da temperatura de vazamento e da espessura sobre o tamanho de grão final da microestrutura austenítica é mostrado na Figura 9, a seguir.

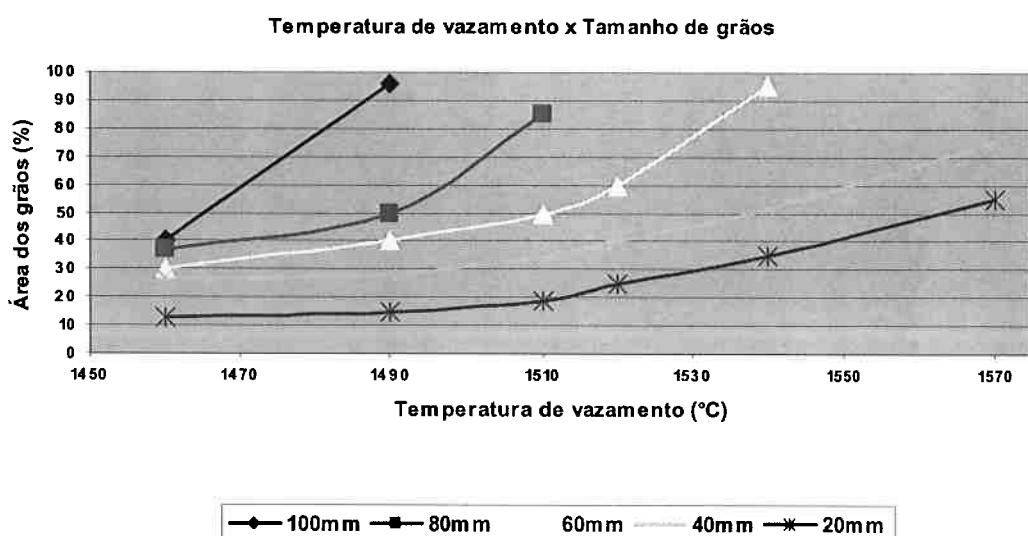


Figura 9 - Efeito da temperatura de vazamento e da espessura das peças no tamanho dos grãos de aço ao manganês do tipo Hadfield. ^(4, 7).

Como a espessura da peça é determinada na etapa de projeto da mesma, a temperatura de vazamento é o fator que determina o tamanho de grão final da microestrutura da peça durante a etapa de fundição.

A propriedade mecânica que sofre uma diminuição maior devido ao aumento do tamanho de grão dos aços Hadfield é a resistência ao impacto^(4, 5, 7) e o aumento do tamanho de grãos aumenta o efeito da segregação de elementos de liga para a região de contornos de grãos, aumentando a formação de eutéticos nestas regiões de contornos. O efeito da temperatura de vazamento sobre a resistência ao impacto destes aços é apresentada na Figura 10, a seguir.

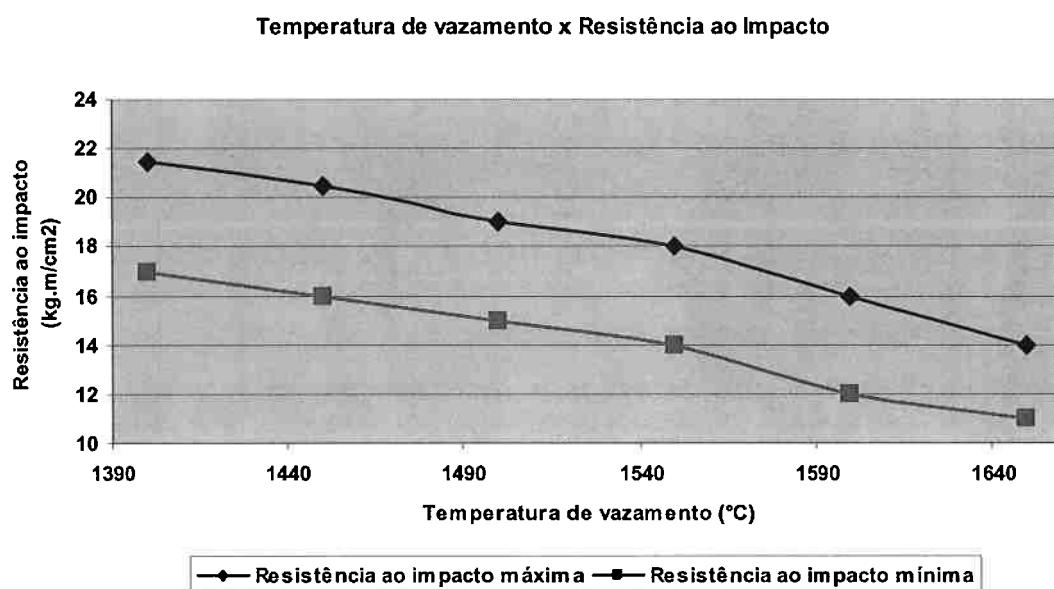


Figura 10 - efeito da temperatura de vazamento sobre a resistência ao impacto dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield^(4, 5).

Verifica-se a necessidade de manter a temperatura de vazamento a mais próxima possível da temperatura de solidificação e com isso garantir uma elevada resistência mecânica dos componentes fundidos em aço do tipo Hadfield.

1.3) Tratamento Térmico

A microestrutura dos aços do tipo Hadfield no estado bruto de fundição são constituídos de grãos austeníticos com carbonetos eutéticos precipitados em contornos de grãos durante a solidificação da liga, carbonetos contínuos precipitados em contornos de grãos e colônias de “perlita” (precipitação descontínua de carbonetos lamelares em matriz de austenita) que (ambos carbonetos em contornos de grãos e colônias de “perlita”) são gerados durante o resfriamento no estado sólido da peça. Um exemplo da estrutura bruta de fundição é apresentado na Figura 11, a seguir.

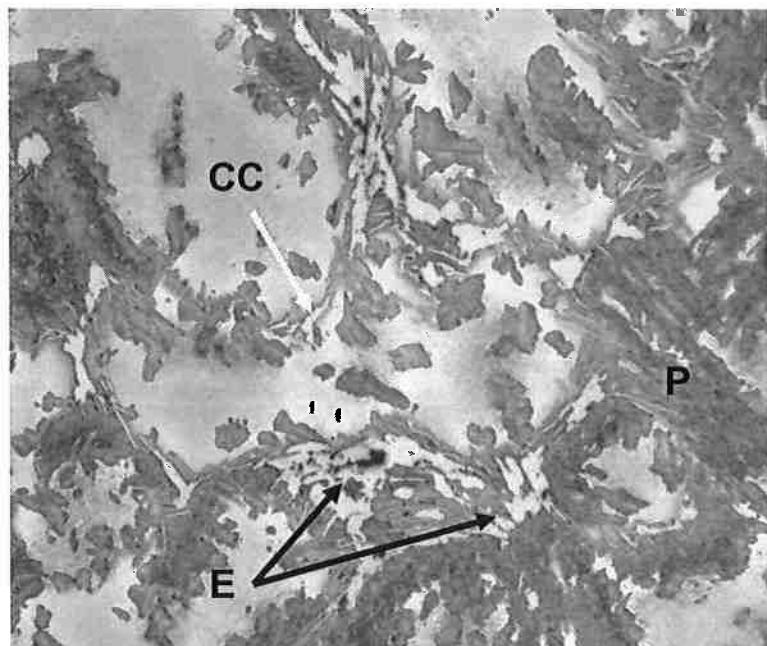


Figura 11 - Micrografia de uma peça fundida em aço Hadfield com espessura de 125mm, no estado bruto de fundição. Nota-se a presença de grãos de austenita com a presença de carbonetos eutéticos (E), carbonetos precipitados em contornos de grãos (CC) e colonias de perlita.(P). Aumento de 100x. Ataque Nital 3%.

A presença de carbonetos precipitados na forma contínua em contornos de grãos é determinante para explicar a baixa tenacidade dos aços Hadfield no estado bruto de fundição. O efeito do recobrimento de carbonetos precipitado na forma contínua em contornos de grãos na resistência ao impacto de diferentes classes de aços Hadfield ^(3, 4, 6).

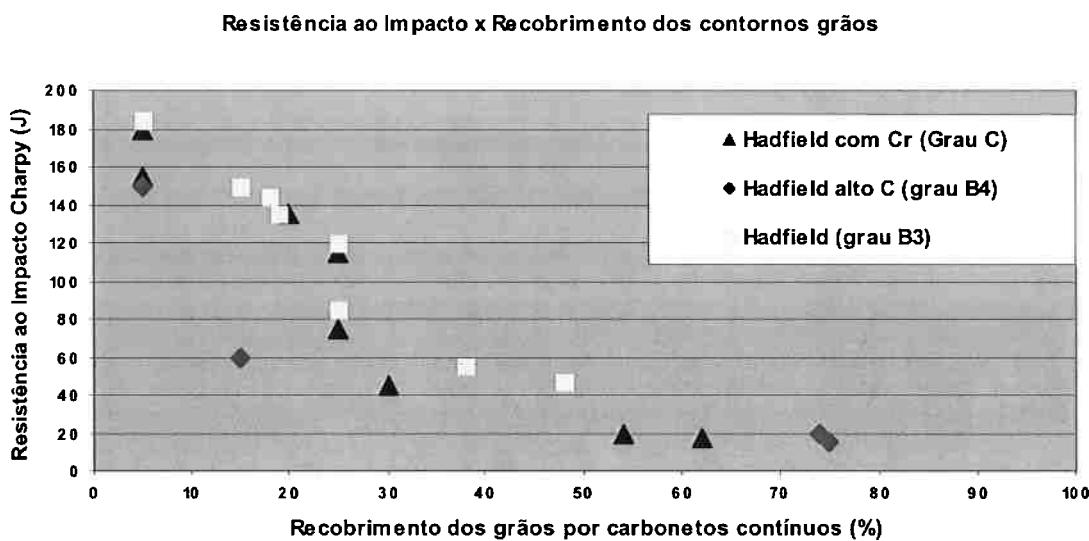


Figura 12 - Efeito do recobrimento dos contornos de grãos por precipitação de carbonetos na forma contínua na resistência ao impacto de diferentes classes de aços austeníticos do tipo Hadfield^(3, 6, 7).

Visando atingir uma elevada resistência ao impacto, os componentes fabricados por fundição são submetidos ao tratamento térmico de solubilização, obtida pela microestrutura constituída de grãos austeníticos.

O tratamento térmico de solubilização consiste no aquecimento, gradual da temperatura da peça dentro dos fornos de solubilização, até a temperatura de estabilidade da fase austenítica. Temperatura na qual ocorrerá a dissolução dos carbonetos precipitados em contornos de grãos e colônias de "perlita" e assim aumentando os teores de carbono e manganês na matriz austenítica. Esta dissolução de elementos de liga na matriz aumenta a estabilidade da austenita. Dependendo da temperatura e do tempo do tratamento de solubilização parte dos carbonetos eutéticos também será dissolvida neta etapa.

A temperatura de dissolução dos carbonetos presentes em contornos de grãos depende do teor de elementos de liga presentes na composição química da mesma, ou seja, quanto maior a porcentagem de elementos de liga presentes na composição química da liga maior será a estabilidade dos carbonetos formados e consequentemente maior será a temperatura necessária para dissolvê-los dentro da matriz austenítica. Um efeito do teor de carbono na temperatura de solubilização de um aço Hadfield é apresentado na Figura 13, a seguir.

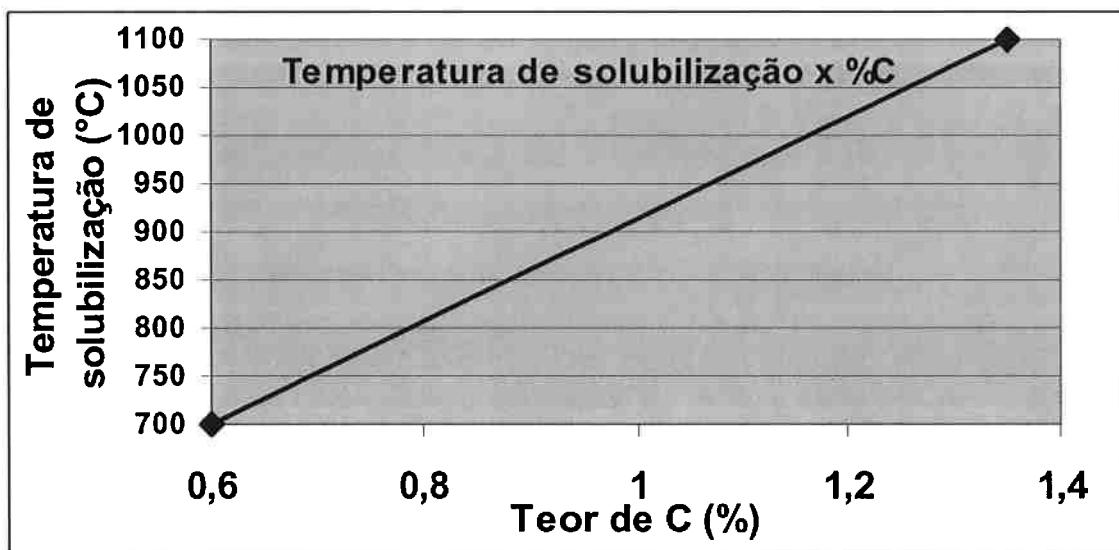


Figura 13 - Efeito do teor de carbono na temperatura de solubilização dos aços Hadfield ^(3, 4).

Ao final do processo de solubilização os componentes devem sofrer um resfriamento, de modo a impedir a difusão do carbono para as regiões de contornos de grãos e assim evitar a re-precipitação de carbonetos na forma contínua dos grãos de austenita.

1.4) Re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos

O resfriamento brusco em água, realizado após o tratamento térmico de solubilização, gera uma acentuada redução da solubilidade de carbono na matriz austenítica. Em consequência, ocorre a difusão dos átomos de carbono para as regiões de contornos de grãos promovendo o aumento do teor de carbono nestas regiões que tende a precipitar carbonetos de ferro (cementita), manganês e/ou cromo na forma contínua.

Assim, se a velocidade de resfriamento for lenta, a peça passará pela faixa de temperatura de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos ,900 a 400°C (ref 4, 5, 6, 7), por um período de tempo suficiente para promover a difusão dos átomos de carbono até a região de contornos de grãos e com isso precipitar carbonetos.

Um modo de relacionar a temperatura com o tempo e as transformações de fases da austenita nos aços Hadfield, que são decorrentes do resfriamento brusco e diminuição da solubilidade de carbono na austenita, são as curvas TTT. Uma curva TTT que representa a re-precipitação de carbonetos em contornos de austenita é apresenta na Figura 14, a seguir.

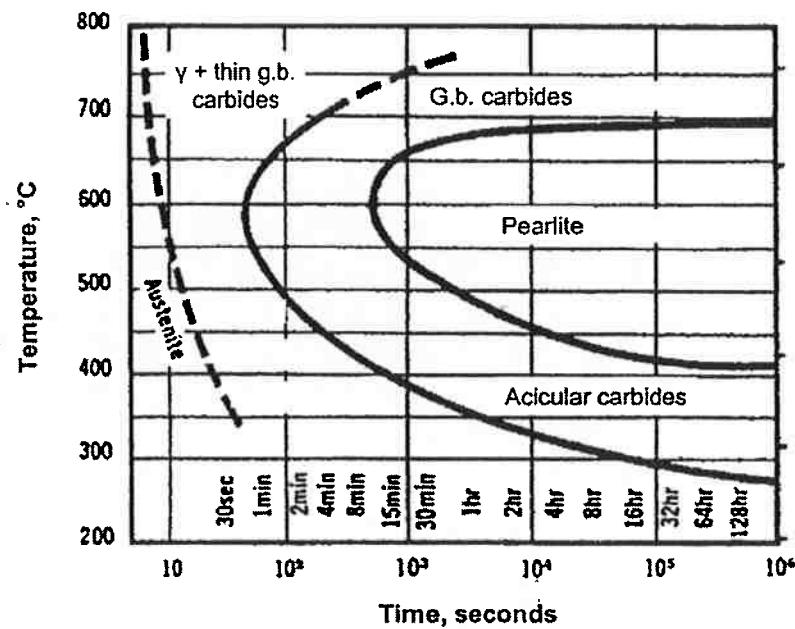


Figura 14 - Representação esquemática de uma curva TTT típica de um aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield. ^(6, 7)

A curva TTT apresenta a faixa de temperatura na qual ocorre a reprecipitação de carbonetos em contornos de grãos (900 – 400°C), o tempo necessário para ocorrer a precipitação dos carbonetos e os diferentes tipos de carbonetos que são gerados nestas transformações de fases.

Existem três tipos de precipitação de carbonetos em contornos de grãos ^(4, 5, 6), a saber:

1. Carbonetos precipitados em contornos de grãos apresentam um aspecto de filmes de carbonetos que envolvem os grãos austeníticos;
2. Carbonetos aciculares apresentam um formato de "agulhas", nucleiam nos contornos de grãos e crescem em direção do interior do grão de austenita;
3. Precipitação descontínua de carbonetos na forma de "perlita" (lamelas justapostas de carbonetos e de austenita);

O autor, Kuyucak, divide o carboneto precipitado em contornos de grãos em duas categorias distintas os "finos" e "grossos" (como apresentado na Figura 14). A distinção entre o tipo fino e grosso é feita da seguinte maneira:

- Os carbonetos finos precipitados em contornos de grãos são caracterizados por delineações, presentes nos contornos de grãos, que observados em microscopia óptica com um aumento de 1000 vezes, não apresentam uma fase distinta entre os grãos de austenita, ou seja, não é possível identificar a presença do carboneto como uma fase distinta da matriz austenítica e apresentam uma espessura menor que $2\mu\text{m}$;
- Os carbonetos grossos precipitados em contornos de grãos são caracterizados pela presença de um fase de carbonetos presente nos contornos de grãos de austenita. Assim, quando observado em microscopia óptica com o aumento de 1000 vezes apresenta uma fase distinta de carboneto entre os grãos de austenita e apresentam um espessura de 0,5 a $5\mu\text{m}$.

Um exemplo de carbonetos precipitados na forma fina e grossa é apresentado na Figura 15 (a) e (b), respectivamente.

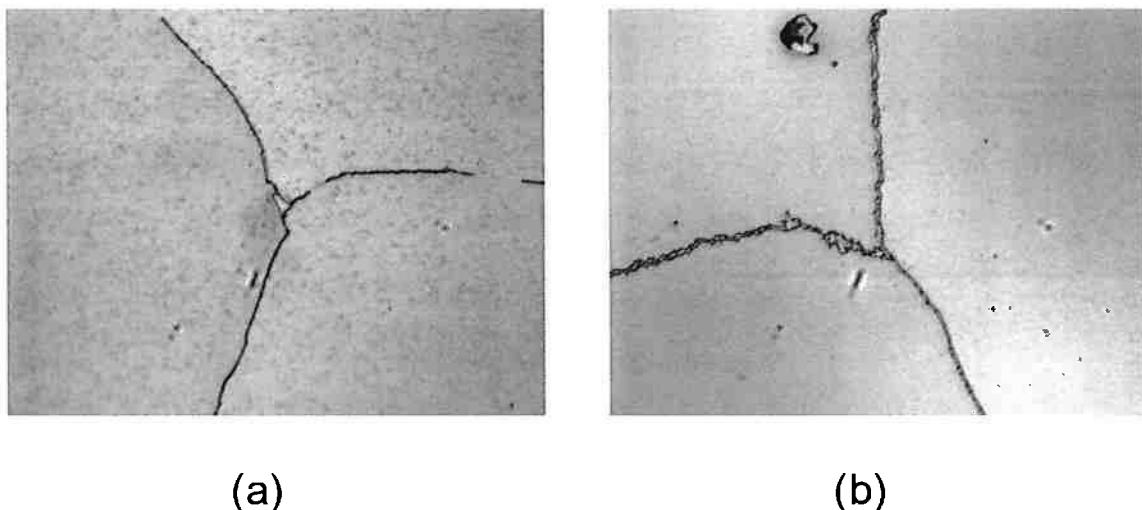


Figura 15 - Exemplos de carbonetos precipitados em contornos de grãos do tipo fino (a) e do tipo grosso (b). Ataque Nital 3%. Aumento de 1000x.

Outras diferenciações são a influência da presença destes tipos de precipitados na resistência ao impacto do material e da nucleação dos mesmos(6).

Os carbonetos precipitados em contornos de grãos do tipo fino seriam uma fase metaestável, nucleiam rapidamente ao longo dos contornos de grãos

austeníticos, na forma discreta. Não apresentam uma influência significativa na resistência ao impacto do aço Hadfield devido a sua pouca espessura (menor que $2\mu\text{m}$) que proporciona uma baixa perda de coesão entre aos grãos de austenita e assim possibilitando a deformação dos grãos de austenita.

Os carbonetos precipitados em contornos de grãos do tipo grosso seriam uma fase estável (cementita), nucleiam e crescem sobre os carbonetos finos, precipitados previamente, na forma contínua. Apresentam um influência significativa na resistência ao impacto dos aços do tipo Hadfield devido a sua maior espessura ($0,5$ a $5\mu\text{m}$) que promove uma acentuada perda na coesão dos grãos de austenita e assim impossibilitando a deformação dos grãos de austenita. A presença destes carbonetos grossos precipitados na forma contínua fragiliza a microestrutura dos aços do tipo Hadfield.

A Figura 16 apresenta os dois tipos de precipitação de carbonetos em contornos de grãos, fino e grosso, que coexistem na microestrutura. A seta representa o ponto de início da precipitação do carboneto do tipo grosso a partir do carboneto do tipo fino, já preexistente.

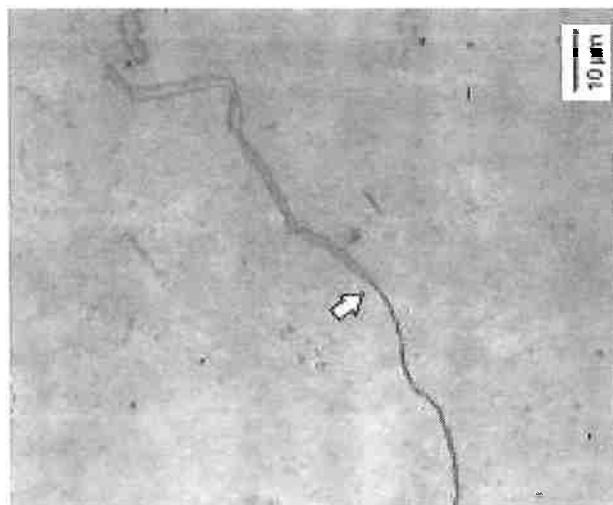


Figura 16 - Micrografia de uma peça com a presença de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos do tipo fino e grosso. A seta indica o inicio da precipitação do carboneto do tipo grosso.

O autor, Kuyucak, chegou as suas conclusões utilizando a microscopia óptica, microscopia eletrônica de transmissão e ensaio de impacto do tipo Charpy. O presente trabalho utilizou a microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e ensaios Charpy para a caracterização destes tipos de precipitados em contornos

de grãos e não apresentou diferenças de morfologia para estes dois tipos de precipitação em específico.

Uma provável explicação para a coexistência destes dois tipos de precipitados, na microestrutura dos aços Hadfield que apresentaram re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, é o fato de ocorrer a nucleação de carbonetos em diferentes tempos durante o resfriamento da peça. Assim, o carboneto que nucleou primeiro tem um tempo maior para crescer e chegar ao estágio de carboneto grosso, o carboneto que nucleou depois teve um tempo menor de crescimento e ficou no estágio de carboneto fino. A região que apresenta início da precipitação do carboneto grosso a partir do carboneto fino, preeexistente, seria apenas a região onde houve o encontro destes dois carbonetos que nuclearam em tempos distintos durante a etapa de resfriamento da peça.

2) MATERIAIS E MÉTODOS

A realização desta etapa foi feita com a utilização de blocos fundidos que representam peças fundidas em aço manganês com alto teor de cromo (ASTM A128 – grade C). Foram realizados tratamentos isotérmicos, dentro da faixa de temperatura de re-precipitação de carbonetos em contornos de grão, para uma reprodução dos carbonetos gerados durante o resfriamento lento de uma peça e seguidos de resfriamento brusco em água. Utilizaram-se ensaios de impacto, do tipo Charpy, para avaliação da resistência ao impacto em diferentes graus de re-precipitação de carbonetos em contornos de grão. A partir destes experimentos foi avaliada a influencia de diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na resistência ao impacto dos aços ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo.

2.1) Materiais

O material utilizado neste trabalho foi fundido pela equipe de engenharia da empresa e recebido no formato de blocos escalonados, onde suas formas e dimensões estão caracterizadas nas Figuras 17 e 18, a seguir.



Figura 17 - Fotografias mostrando o formato dos blocos utilizados neste trabalho.

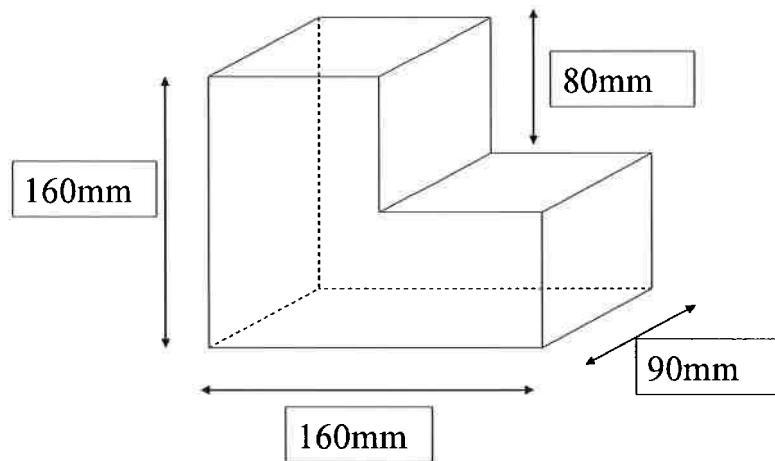


Figura 18 - Desenho mostrando as dimensões dos blocos utilizados neste trabalho.

Um fato importante é modo como foram fundidos os blocos escalonados, fato que influencia na quantidade de poros presentes em diferentes regiões da peça. A Figura 19 representa um esquema da peça com o posicionamento do canal de ataque, do massalote e a região que apresenta menor concentração de poros.

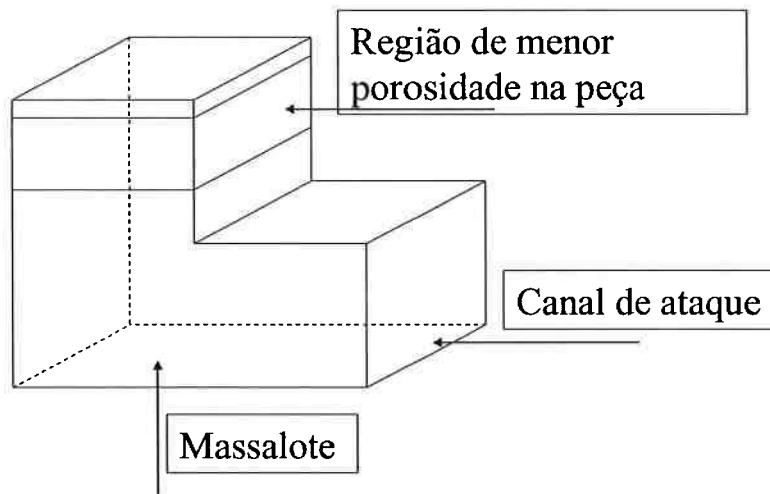


Figura 19 - Desenho esquemático do posicionamento do canal de ataque, massalote e região de menor porosidade da peça.

A composição química do aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo, fornecida equipe de engenharia da Metso Minerals é apresentada na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Composição química do aço Hadfield com alto teor de cromo. Fornecido pela Metso Minerals

	Elementos									
	%C	%Mn	%Cr	%Si	%Mo	%P	%S	%Ni	%Al	
Composição Química	1,05	12,12	1,35	0,51	0,045	0,033	0,0036	0,038	0,043	

2.2) Retirada de amostras

Através de corte, com o auxilio de cutt-off, foram retirados dois tipos de amostras, a saber.

1. Cubos de aproximadamente 10mm de aresta;
2. Placas com 90mm de comprimento, 90mm de largura e 20mm de espessura;

As amostras cúbicas foram encaminhadas para caracterização do material no estado bruto de fundição e para a etapa de tratamento isotérmico, onde foi determinada a temperatura na qual ocorre a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua. A Figura 20 mostra o aspecto das amostras cúbicas.



Figura 20 - Fotografia da amostra com formato cúbico.

As amostras com formato de placa foram encaminhadas para a etapa de tratamento isotérmico, para a reprodução de diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, e após a etapa de tratamento isotérmico foram encaminhadas para a usinagem onde foram retirados corpos de prova, ao longo da placa, para a realização de ensaios de impacto padronizados do tipo Charpy. As placas foram retiradas da região que apresentou a menor porosidade do material recebido, a Figura 21 apresenta um esquema das dimensões das placas retiradas e da região onde foram extraídas dos blocos escalonados recebidos.

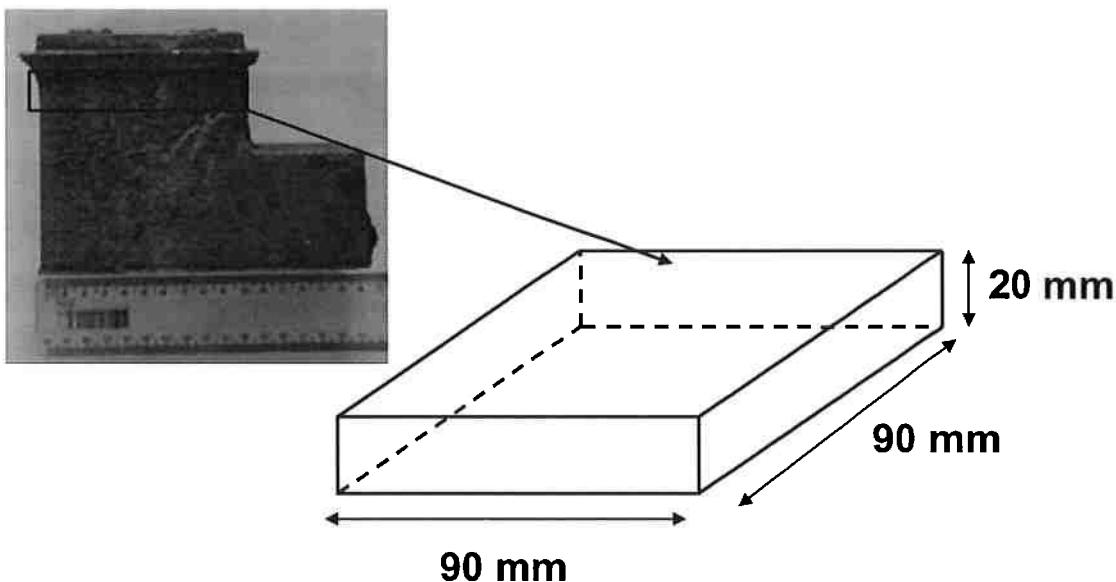


Figura 21 - Representação esquemática da região onde foram extraídas as placas e suas dimensões.

2.3) Tratamento Isotérmico

O tratamento isotérmico tem como objetivo reproduzir diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos. O tratamento isotérmico consiste em três etapas, a saber,

1. Solubilização – Etapa de temperatura mais elevada (1120°C), caracterizada pelo aquecimento das amostras da temperatura ambiente até a temperatura de solubilização e pelo tempo de residência de 3 horas nesta temperatura desejada. O objetivo é promover à total dissolução dos carbonetos massivos, colônias de “perlita” e carbonetos precipitados em contornos de grão presentes no aço bruto de fundição e obter uma total solubilização e homogeneização dos elementos de liga no interior da matriz austenítica;
2. Banho de Sal – Etapa de temperatura mais baixa (faixa de re-precipitação de carbonetos em contornos de grão 900 a 400°C), caracterizada pelo resfriamento da temperatura de solubilização até a temperatura do banho de sal e pelo tempo de residência nesta dada temperatura. O objetivo é promover condições cinéticas suficientes que promovam à re-precipitação de carbonetos em contornos de grão. Assim, com a imersão das amostras dentro do banho de sal e o

controle sobre o tempo de residência em tal etapa, pode-se acompanhar a cinética de re-precipitação de carbonetos em contornos de grão através de análise metalográfica das mesmas;

3. Resfriamento em Água – Etapa onde ocorre o resfriamento brusco das amostras até a temperatura ambiente, caracterizada pelo rápido resfriamento da temperatura na etapa de banho de sal até a temperatura ambiente. Gera um “congelamento” da microestrutura obtida na etapa anterior, para ser feita uma posterior análise metalográfica;

Uma representação esquemática de um tratamento isotérmico, genérico, é apresentada na Figura 22, a seguir.

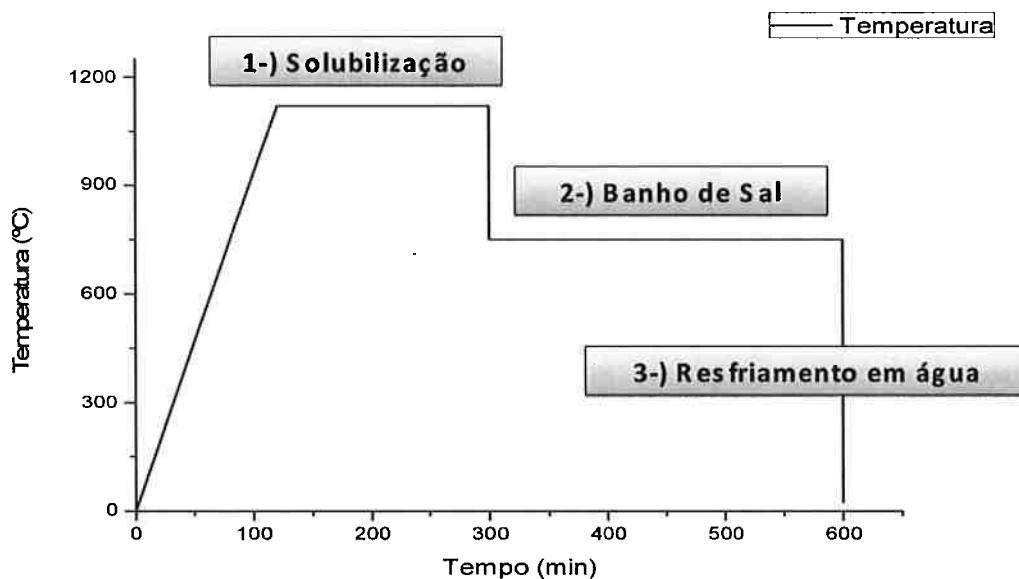


Figura 22 - Representação esquemática de um tratamento isotérmico.

O tratamento isotérmico é diferenciado pela temperatura e tempo de residência na etapa de banho de sal. Cada tratamento isotérmico apresenta uma temperatura estipulada do banho de sal e tempos de residência que variam para proporcionar um acompanhamento da cinética de transformações de fases. Assim, a fase austenítica, obtida durante etapa de solubilização, sofre decomposição (austenita \rightarrow austenita + carboneto) que é acompanhada ao longo do tempo na a

faixa de temperatura onde ocorre a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos.

Foram feitos 5 tratamentos isotérmicos neste ao total, sendo quatro tratamentos isotérmicos para as amostras de formato cúbico e um tratamento isotérmico para as amostras em forma de placa, encaminhadas para confecção de corpos de prova para realização de ensaios padronizados do tipo Charpy. A Tabela 5 apresenta um resumo das temperaturas e tempos de residência testados para cada tipo de amostras tratadas isotérmicamente.

Tabela 4 - Apresenta um resumo das temperaturas e dos tempos de residência dos 5 tratamentos isotérmicos realizados.

Amostras cúbicas		Placas	
Temperatura (°C)	Tempos de residência (minutos)	Temperatura (°C)	Tempos de residência (minutos)
450	1	750	1
	5		2
	15		5
	40		10
	2		20
600	4		
	6		
	8		
	10		
	12		
	15		
	40		
	2		
750	5		
	10		
	15		
	20		
	25		
	35		
	1		
	5		
850	15		
	30		

Um estudo inicial foi feito, com as amostras cúbicas, para a determinação da temperatura na qual ocorre a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, de modo semelhante ao encontrado em peças que sofrem resfriamento lento após etapa de tratamento térmico de solubilização. Tal estudo inicial mostra que a temperatura de 750°C foi a que apresentou uma morfologia semelhante e uma cinética de transformação de fases mais rápida dentre as temperaturas testadas nestes tratamentos isotérmicos iniciais. O anexo A apresenta o resultados obtidos neste estudo inicial.

Assim, afim de avaliar do efeito de diferentes níveis de re-precipitação na resistência ao impacto do aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield foi realizado o tratamento isotérmico com a temperatura de 750°C com tempos de residência de 1, 2, 5, 10, 20 minutos nas amostras em formato de placa.

Ao final da etapa de tratamento isotérmico, obteve-se seis placas com diferentes níveis de precipitação e foram classificadas de acordo com a Tabela 5, apresentada a seguir.

Tabela 5 - Identificação das placas tratadas isotérmicamente a temepratura de 750°C.

Identificação	Tempo de residência na etapa de banho de sal (minutos)
Solubilizado	0
1	1
2	2
3	5
4	10
5	20

Após as placas serem tratadas isotermicamente foram retirados corpos de provas, de acordo com a norma ASTM E23, para realização de ensaios de impacto padronizado do tipo Charpy.

2.4) Ensaio Charpy

Os ensaios de impacto padronizados do tipo Charpy, foram realizados com o objetivo de avaliar a influência da presença de diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na microestrutura dos aços Hadfield com alto teor de cromo, que foram obtidos na etapa de tratamento isotérmico.

Os corpos de provas usados nesta etapa foram retirados a partir das placas, previamente tratadas na etapa de tratamento isotérmico. Foram enviados a uma empresa de usinagem para conformação de suas dimensões e especificações de acordo com a norma ASTM E23. Um resumo das dimensões e especificações da norma ASTM E23 é mostrado na Figura 23, a seguir.

Todas as dimensões em mm

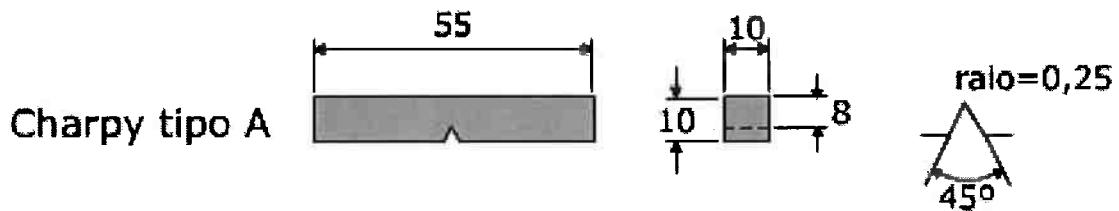


Figura 23 - Representação das dimensões e especificações da norma ASTM E23.

Os corpos de prova foram ensaiados, pela equipe de engenharia da Metso Minerals, no equipamento de ensaio Charpy e as amostras encontravam-se a temperatura ambiente. Uma representação do equipamento e posicionamento dos corpos de provas durante o ensaio é mostrada na Figura 24, a seguir.

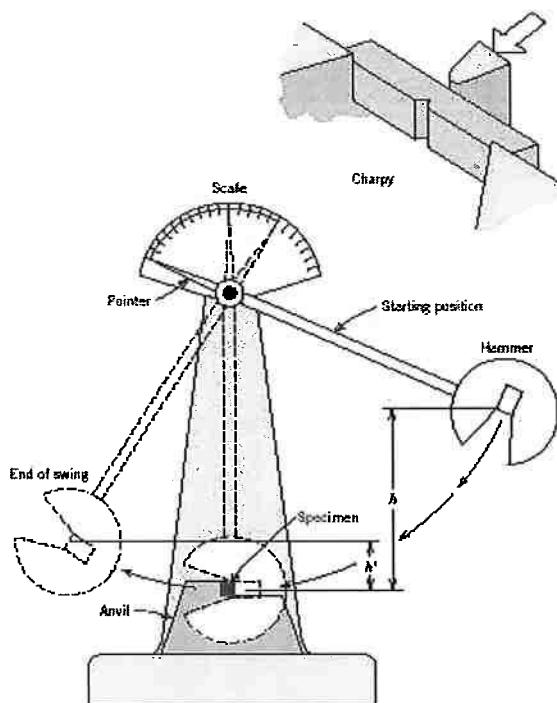


Figura 24 - Representação do equipamento e posicionamento do corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios de impacto padronizados do tipo Charpy.

2.5) Preparação Metalográfica

A preparação das amostras para análise por microscopia óptica seguiu o método convencional de preparação metalográfica, por meio de lixamento até lixa de grana 1000 e polimento em suspensão de diamante até $1\mu\text{m}$. A revelação da microestrutura foi feita com imersão em Nital 3% pelo tempo de 15 segundos.

A preparação das amostras para análise por microscopia eletrônica seguiu o método convencional de preparação metalográfica, semelhante ao descrito para microscopia óptica. A revelação e liberação dos carbonetos em contornos de grãos foi feita através da imersão de uma solução contendo 5% de ácido nítrico (68% de concentração molar), 5% EDTA (3% em solução aquosa) e 90% etanol PA, por um período de tempo de 10 minutos.

3.) RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1) Amostra bruta de fundição

A caracterização do corpo de prova no estado bruto de fundição tem como objetivo estabelecer um ponto de partida bem definido, para tal foi utilizada apenas a microscopia óptica. As Figuras 25 e 26 mostram o aspecto da microestrutura no estado bruto de fundição do aço Hadfield com alto teor de cromo.

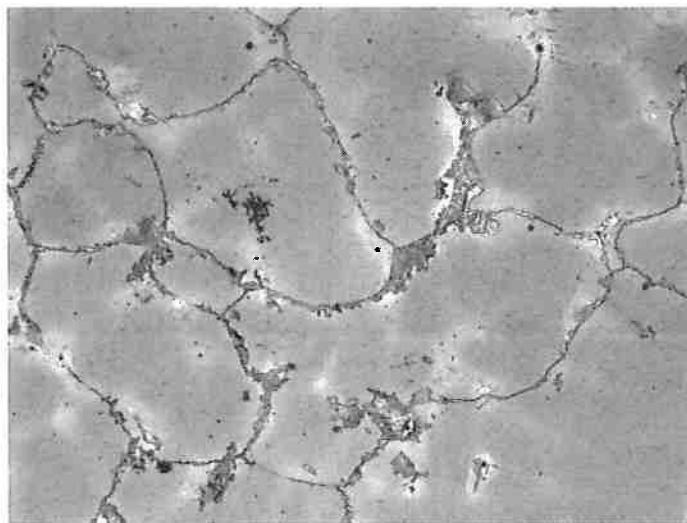


Figura 25 - Mostra uma microestrutura constituída essencialmente de grãos austeníticos e recobertos por diferentes tipos de carbonetos precipitados durante resfriamento lento no molde. Ataque Nital 3%. Aumento de 200x.

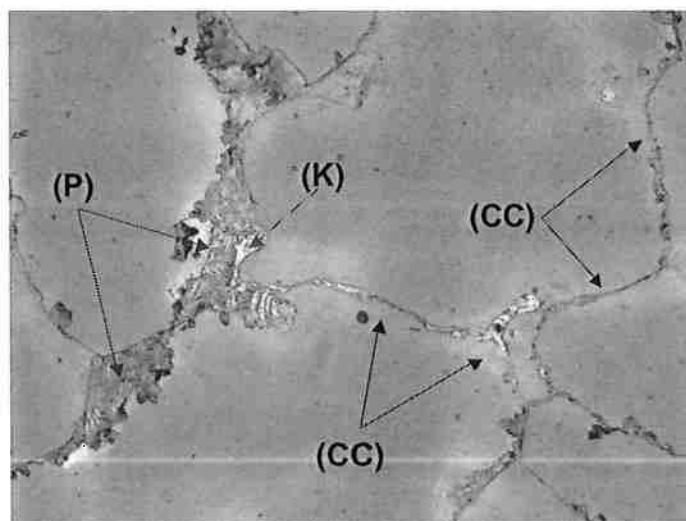


Figura 26 - Mostra uma microestrutura constituída essencialmente de grãos austeníticos e recobertos por diferentes tipos de carbonetos precipitados durante resfriamento lento no molde Carboneto

eutético (E), carbonetos precipitados em contornos de grãos (CC) e colônias de "perlita" (P). Ataque Nital 3%. Aumento de 400x.

A microestrutura bruta de fundição é constituída, essencialmente, de grãos austeníticos, nota-se a presença de uma quantidade elevada de carbonetos precipitados em contornos de grãos, tais carbonetos precipitados são gerados durante resfriamento lento da peça no molde de fundição.

A microestrutura apresentada é adequada à microestrutura prevista pela literatura que apresenta grãos austeníticos com a precipitação de três principais tipos de carbonetos precipitados em contornos de grãos, que são carbonetos eutéticos, carbonetos precipitados em contornos de grãos e colônias de "perlita", como mostrado na Figura 26.

3.2) Amostra no estado solubilizado

A caracterização do aço Hadfield no estado solubilizado tem o intuito de estabelecer a microestrutura e o valor de resistência ao impacto obtida com a microestrutura constituída essencialmente de grãos autênticos e livres de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Assim, estabelecendo uma microestrutura e valor de resistência ao impacto de referência.

Utilizou-se de microscopia óptica e ensaio Charpy para a caracterização das amostras no estado solubilizado. As Figuras 27 e 28 mostram a microestrutura da placa no estado solubilizado.

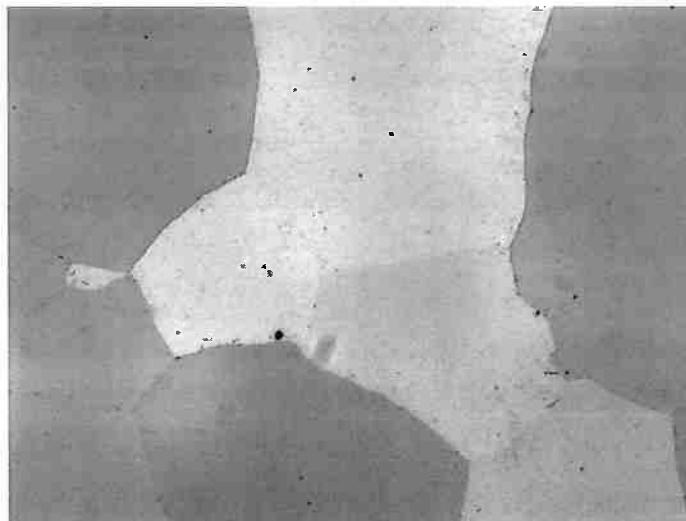


Figura 27 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo. Apresenta grãos de austenita livres de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

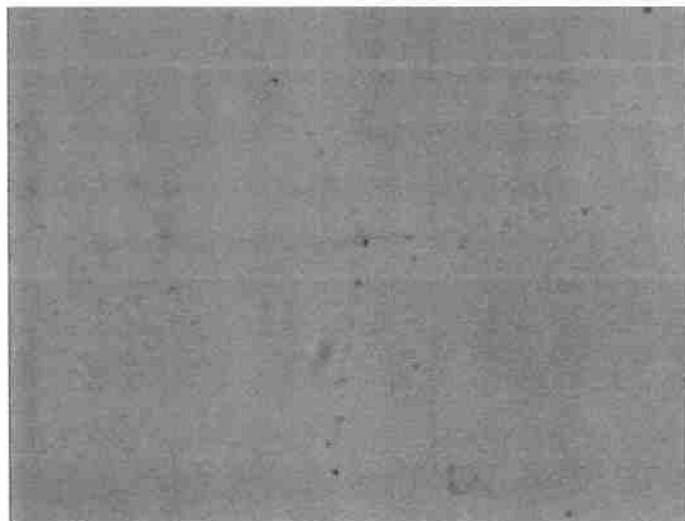


Figura 28 - Microestrutura de um aço Hadfield com alto teor de cromo. Mostra os contornos de grãos livres de re-precipitação de carbonetos. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

A microestrutura obtida mostra grãos de austenita que apresentam os contornos de grãos, praticamente, livres de re-precipitação de carbonetos. Apenas alguns pontos dos contornos de grãos apresentaram re-precipitação de carbonetos, que mostra uma rápida velocidade de nucleação dos carbonetos mesmo numa amostra de 20mm de espessura.

Os resultados de resistência ao impacto dos 4 corpos de provas do tipo Charpy retirados da placa no estado solubilizado e ensaiados a temperatura ambiente, são mostrados na Tabela 5, a seguir.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo no estado solubilizado.

Número	Energia Impacto (J)
1	158,9
2	178,5
3	184,4
4	188,3
Média	177,525

O valor de 177J encontrado representa uma elevada de resistência ao impacto, muito semelhante aos encontrados para os aços Hadfield na literatura.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado solubilizado é apresentada na Figura 29, a seguir.



Figura 29 - Micrografia do corte longitudinal de uma amostra de prova, no estado solubilizado após a realização de ensaio Charpy. Nota-se o alongamento dos grãos de austenita e a presença de linhas de deformação gerados durante o ensaio de impacto. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

O alongamento dos grãos de austenita e as linhas de deformação, na região onde ocorreu a fratura do corpo de prova, são consequência da deformação plástica que o material sofreu durante a realização do ensaio de impacto.

A microestrutura, obtida na etapa de solubilização, é constituída de grãos austeníticos sem a presença de carbonetos precipitados em contornos de grãos. Tal característica possibilita ocorrer a deformação plástica do corpo de prova fraturado durante ensaio de impacto.

Os grãos de austenita apresentam uma ductilidade elevada e absorvem altos valores de energia durante o ensaio de impacto, assim os elevados valores de energia absorvida registrado durante o ensaio de impacto e observação da deformação plástica ocorrida na região fraturada do corpo de prova caracterizam um mecanismo de fratura do tipo.

3.3) Tratamento isotérmico a 750°C

Cinco níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos foram obtidos com o tratamento isotérmico a temperatura de 750°C. Os diferentes níveis de re-precipitação foram atingidos pelos diferentes tempos de residência, na etapa de banho de sal, das placas. Os resultados obtidos desta etapa serão mostrados de acordo com os tempos de residência das placas na etapa de banho de sal a temperatura de 750°C.

Utilizou-se a microscopia óptica e ensaio de impacto do tipo Charpy para avaliação do efeito da presença de diferentes níveis de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos obtidos pelo tratamento isotérmico a temperatura de 750°C.

3.3.1) Tempo de residência de 1 minuto

As figuras 30, 31 e 32 apresentam as micrografias obtidas da placa tratada isotermicamente pelo tempo de 1 minuto a temperatura de 750°C com diferentes aumentos.

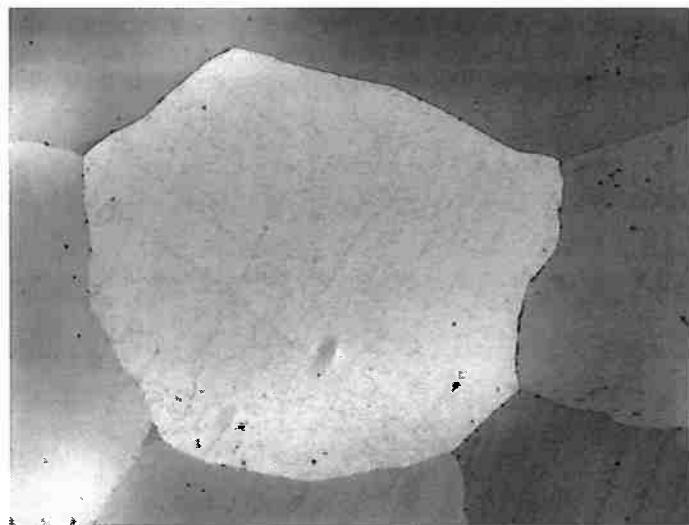


Figura 30 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 1 minuto. Apresenta grãos de austenita sem precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

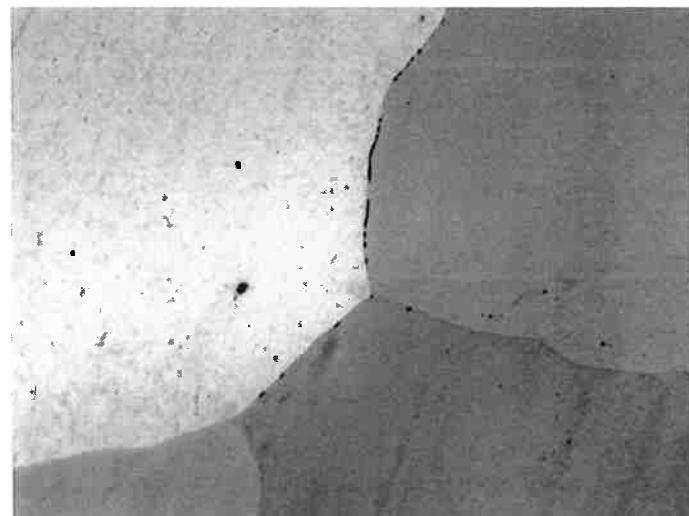


Figura 31 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 1 minuto. Apresenta grãos de austenita com a presença de carbonetos re-precipitados na forma descontínua ao longo dos contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

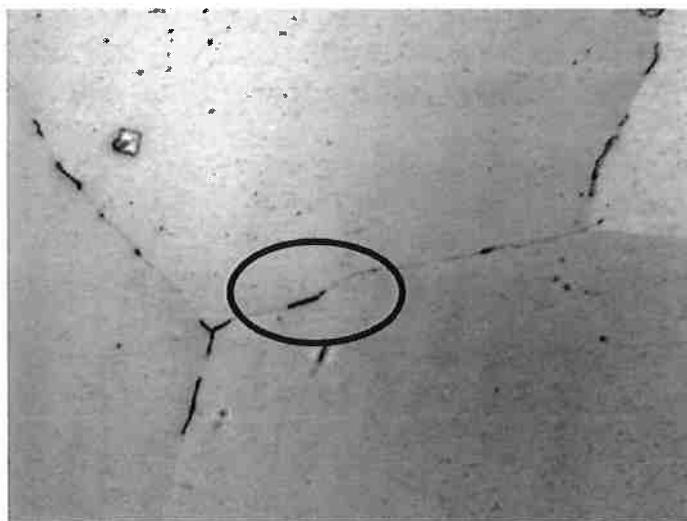


Figura 32 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 1 minuto. O detalhe representa um carboneto precipitado no contorno de grão da austenita na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 1000x.

A microestrutura obtida é constituída de grãos austeníticos e a presença de precipitação de carbonetos na região de contornos de grãos. Tal precipitação pode ser considerada de formato descontínuo, pois os grãos não são completamente envolvidos pela re-precipitação de carbonetos.

Os ensaios Charpy realizados para este nível de re-precipitação obtido são apresentados na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo após o tempo de residência de 1 minuto no tratamento isotérmico a 750°C.

Número	Energia Impacto (J)
1	204
2	153
3	200
Média	185,67

O valor de 185J, obtido a partir da média de valores do ensaio de resistência ao impacto para os corpos de provas ensaiados, apresenta uma ordem de grandeza semelhante ao valor obtido pelos corpos de prova no estado solubilizado (180J) e indica uma elevada energia absorvida durante o ensaio do tipo Charpy para este nível de re-precipitação apresentado.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado de 1 minuto de tratamento isotérmico a 750°C é apresentada na Figura 33, a seguir.



Figura 33 - Micrografia do corte longitudinal de uma corpo de prova, no estado de 1 minuto a 750°C, após a realização de ensaio Charpy. Nota-se o alongamento dos grãos de austenita e a presença de linhas de deformação gerados durante o ensaio de impacto. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

As linhas de deformações e o alongamento dos grãos austeníticos apresentado para as amostras tratadas isotermicamente a 750°C pelo tempo de 1 minuto, são consequência da deformação plástica ocorrida durante os ensaios de resistência ao impacto. Tal deformação e aspecto dos corpos de prova fraturados indicam um comportamento de fratura semelhante ao ocorrido no material no estado solubilizado.

Pode-se concluir que a presença de um nível de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma descontínua, obtido pelo tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 1 minuto, apresenta pouca influência na resistência ao impacto dos aços Hadfield com alto teor de cromo.

3.3.2) Tempo de residência de 2 minutos

As figuras 34, 35 e 36 apresentam as micrografias obtidas da placa tratada isotermicamente pelo tempo de 2 minutos a temperatura de 750°C com diferentes aumentos.

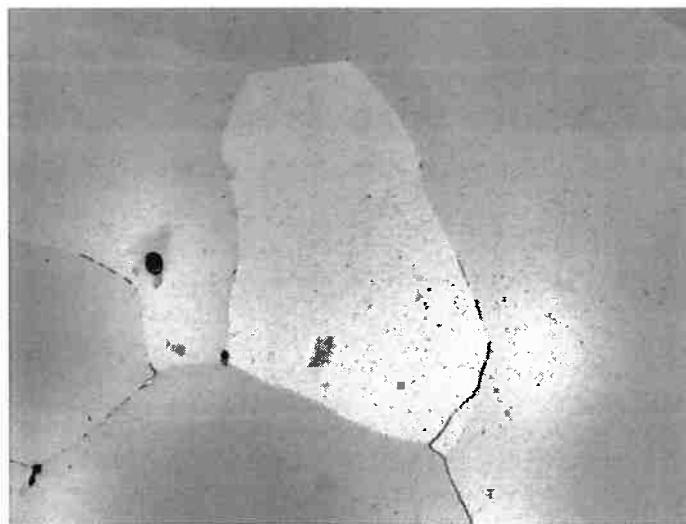


Figura 34 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 2 minutos. Apresenta grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

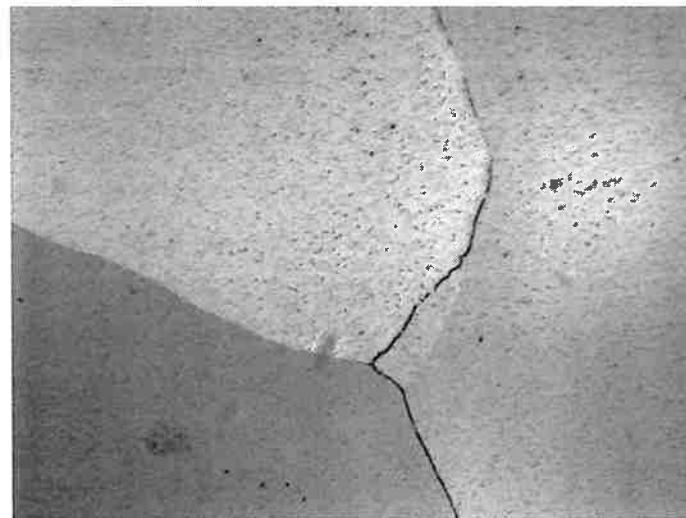


Figura 35 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 2 minutos. Apresenta grãos de austenita com a presença de carbonetos re-precipitados na forma descontínua ao longo dos contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

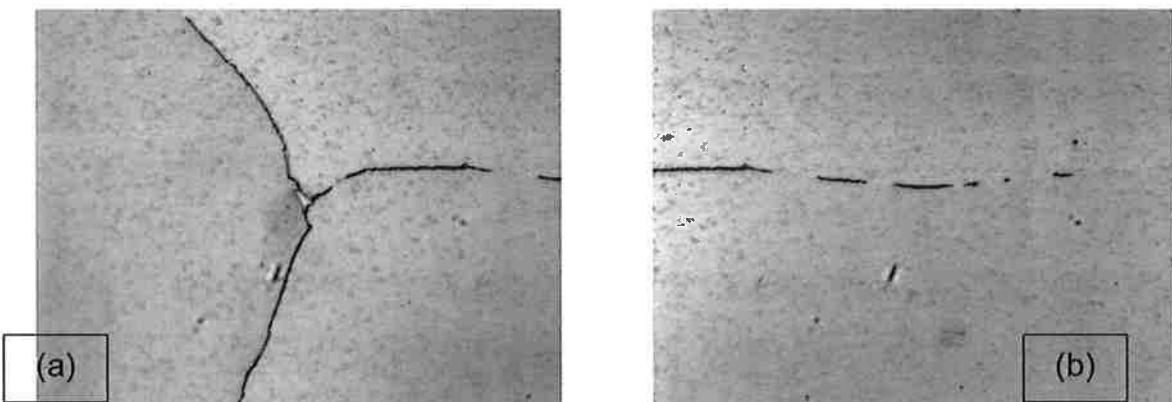


Figura 36 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 2 minutos. Um maior aumento revela grãos de austenita com a presença de carbonetos re-precipitados em contornos de grãos (a). Apresenta uma precipitação de carbonetos na forma descontínua (b). Ataque Nital 3%. Aumento 1000x.

A microestrutura obtida é constituída de grãos austeníticos e a presença de precipitação de carbonetos na região de contornos de grãos. Tal precipitação pode ser considerada de formato descontínuo, pois os grãos não são completamente envolvidos pela re-precipitação de carbonetos.

Os ensaios Charpy realizados para este nível de re-precipitação, obtido após tratamento isotérmico pelo tempo de 2 minutos, são apresentados na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo após o tempo de residência de 2 minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

Número	Energia Impacto (J)
1	162,8
2	190,3
3	194,2
Média	182,43

O valor de 182J, obtido a partir da média de valores do ensaio de resistência ao impacto para os corpos de provas ensaiados, apresenta uma ordem de grandeza semelhante ao valor obtido pelos corpos de prova no estado solubilizado (180J) e indicam uma elevada energia absorvida durante o ensaio do tipo Charpy para este nível de re-precipitação apresentado.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado de 2 minutos de tratamento isotérmico a 750°C é apresentada na Figura 37, a seguir.

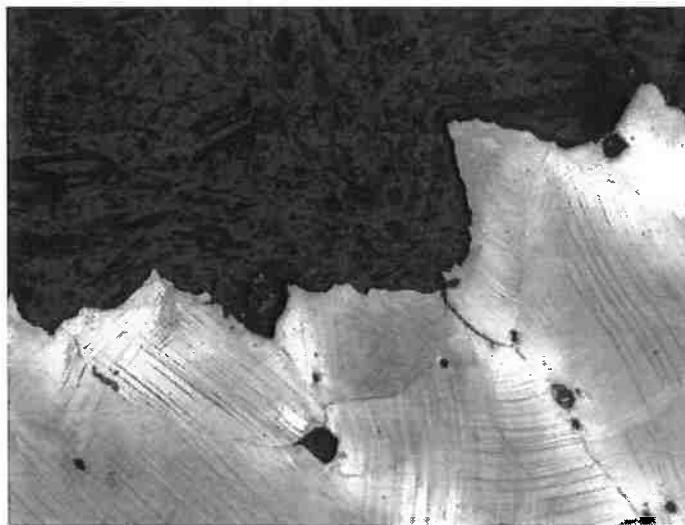


Figura 37 - Micrografia do corte longitudinal de uma corpo de prova, no estado de 2 minutos a 750°C, após a realização de ensaio Charpy. Nota-se o alongamento dos grãos de austenita e a presença de linhas de deformação gerados durante o ensaio de impacto. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

As linhas de deformações e o alongamento dos grãos austeníticos apresentado para as amostras tratadas isotermicamente a 750°C pelo tempo de 2 minutos, são consequência da deformação plástica ocorrida durante os ensaios de resistência ao impacto. Tal deformação e aspecto dos corpos de prova fraturados indicam um comportamento de fratura semelhante ao ocorrido no material no estado solubilizado.

Pode-se concluir que a presença de um nível de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma descontínua, obtido com o tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 2 minutos, apresenta pouca influência na resistência ao impacto dos aços Hadfield com alto teor de cromo.

3.3.3) Tempo de residência de 5 minutos

As figuras 38, 39 e 40 apresentam as micrografias obtidas da placa tratada isotermicamente pelo tempo de 5 minutos a temperatura de 750°C, com diferentes aumentos.

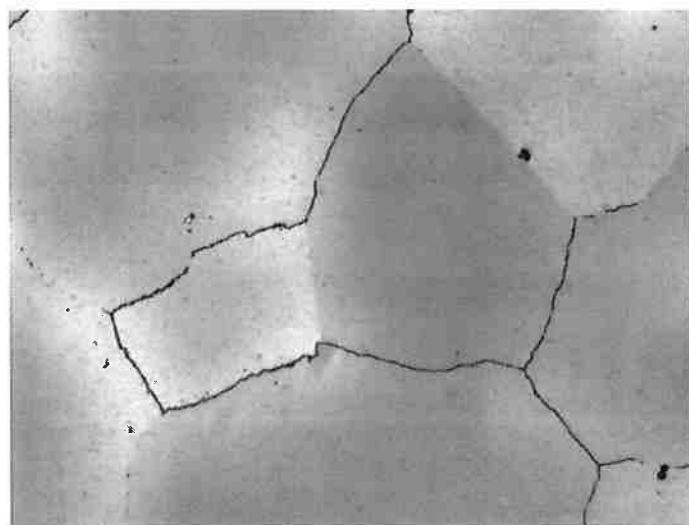


Figura 38 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 5 minutos. Apresenta grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

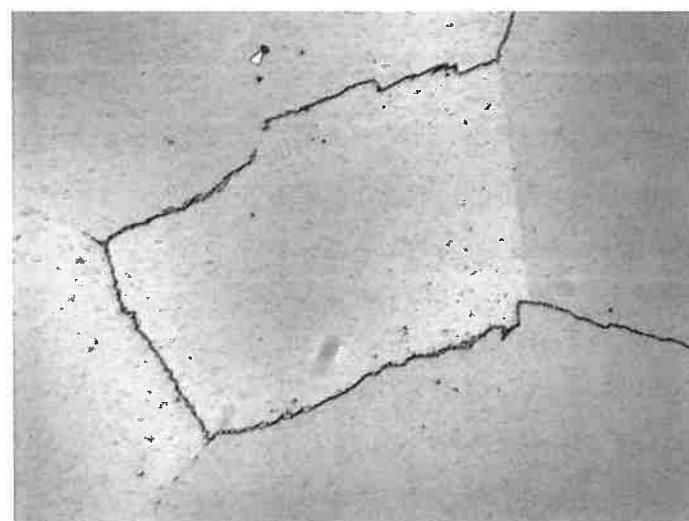


Figura 39 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 5 minutos. Grãos de austenita apresentam re-precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grãos com um aspecto contínuo. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

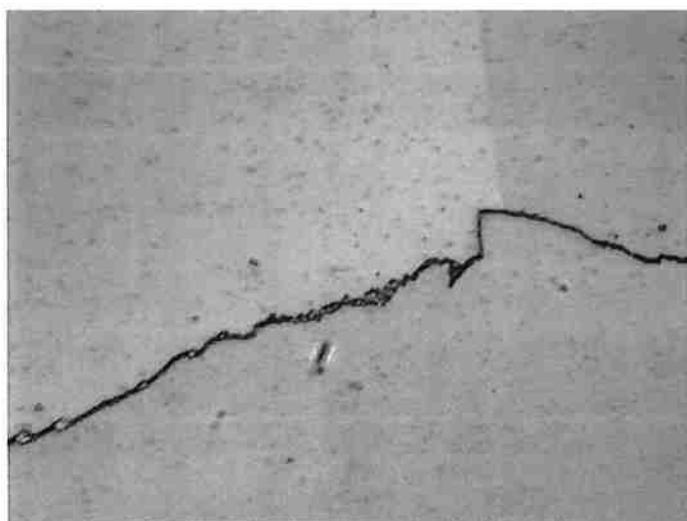


Figura 40 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 5 minutos. Observa-se uma forma contínua de re-precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 1000x.

A microestrutura obtida pelo tratamento isotérmico a 750°C por tempo de 5 minutos apresenta precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Tal precipitação apresenta uma forma contínua, pois os carbonetos precipitados criam uma rede de filme contínuo que envolve os grãos de austenita.

Os ensaios Charpy realizados para este nível de re-precipitação, obtido após tratamento isotérmico pelo tempo de 5 minutos, são apresentados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo após o tempo de residência de 5 minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

Número	Energia Impacto (J)
1	49
2	56,9
3	58,8
4	68,7
Média	58,35

O valor de 58J, obtido a partir da média de valores do ensaio de resistência ao impacto para os corpos de provas ensaiados, apresenta uma ordem de grandeza consideravelmente menor que ao valor obtido pelos corpos de prova no estado solubilizado (180J). O valor de energia absorvida, durante o ensaio do tipo Charpy,

indica uma perda significativa de resistência ao impacto devido à presença deste nível de re-precipitação.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado de 5 minutos de tratamento isotérmico a 750°C é apresentada na Figura 41, a seguir.

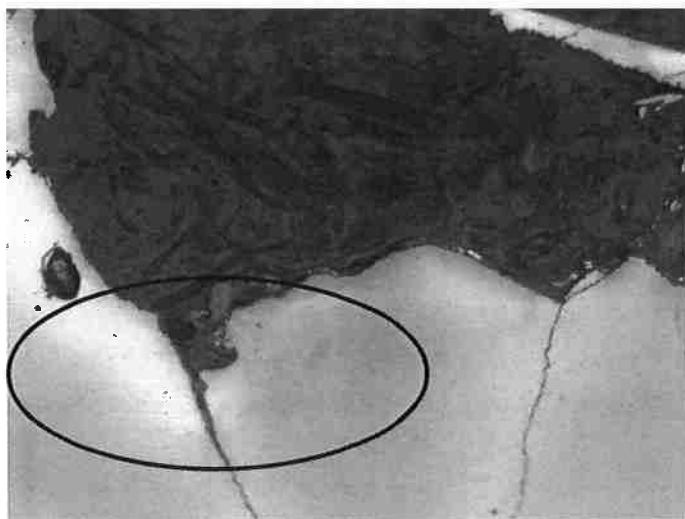


Figura 41 - Micrografia do corte longitudinal de uma corpo de prova, no estado de 5 minutos a 750°C, após a realização de ensaio Charpy. Nota-se uma fratura mais faceada que acompanha os formato dos grãos austeníticos. Em detalhe a trinca "caminhando" preferencialmente pelos contornos de grãos da microestrutura. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

A microestrutura, obtida após o tratamento isotérmico de 750°C com cinco minutos de tempo de residência, apresenta uma rede contínua de carbonetos precipitados em contornos de grãos. Assim, os grãos de austenita encontram-se envolvidos por uma camada contínua de carbonetos precipitados ao longo dos contornos de grãos.

O resultado de resistência ao impacto, apresentado pelos ensaios de impactos do tipo Charpy, indicam um perda significativa do valor de energia absorvida pela presença de carbonetos precipitados na forma contínua ao longo dos contornos de grãos.

A análise metalográfica da região fraturada do corpo de prova de ensaio Charpy, mostra uma mudança no mecanismo de fratura devido a presença da re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos. A presença de uma rede contínua de carbonetos representa a existência de uma camada contínua de

carbonetos (cementita), cuja ductilidade é muito baixa. Esta fase quando submetida a esforços mecânicos de impacto tendem a fraturar por clivagem (fratura frágil).

Assim, um aço austenítico do tipo Hadfield que apresente uma re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua, como o nível de re-precipitação obtido com o tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de cinco minutos, irá sofrer um comportamento de fratura frágil, quando submetido a esforços mecânicos de impacto. A presença dos carbonetos ao redor dos grãos de austenita impede a capacidade de deformação plástica dos grãos austeníticos, pois o limite de resistência da fase frágil (carboneto) é muito menor que o limite de resistência da fase austenítica (fase dúctil).

3.3.4) Tempo de residência de 10 minutos

As figuras 42, 43 e 44 apresentam as micrografias obtidas da placa tratada isotermicamente pelo tempo de 10 minutos a temperatura de 750°C, com diferentes aumentos.

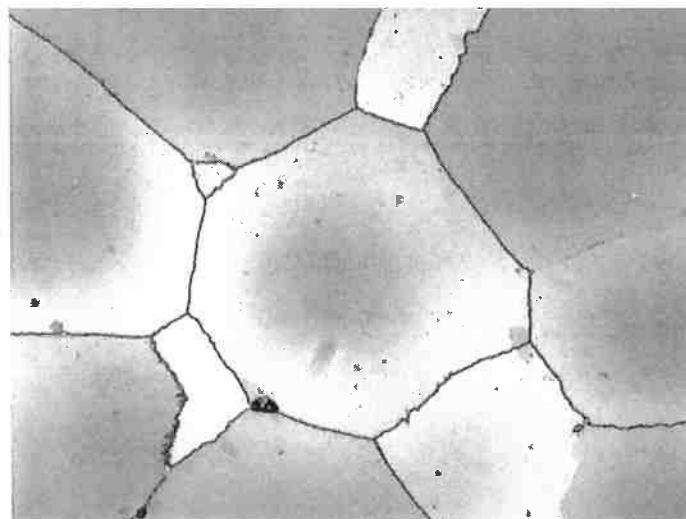


Figura 42 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 10 minutos. Apresenta grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

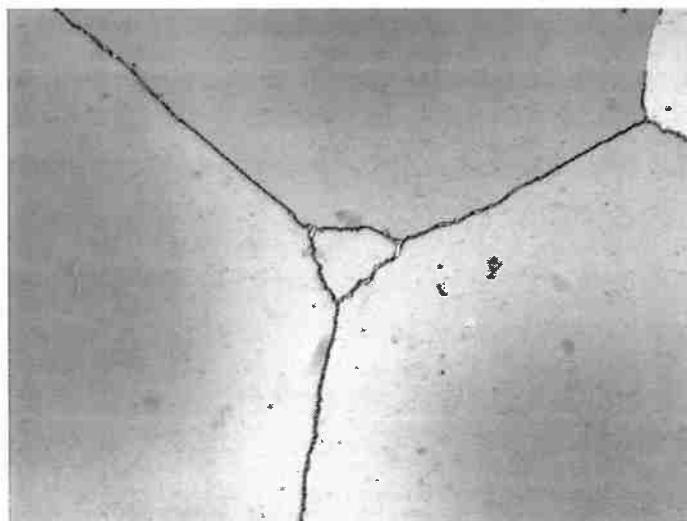


Figura 43 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 10 minutos. Grãos de austenita apresentam re-precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grãos com um aspecto contínuo. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

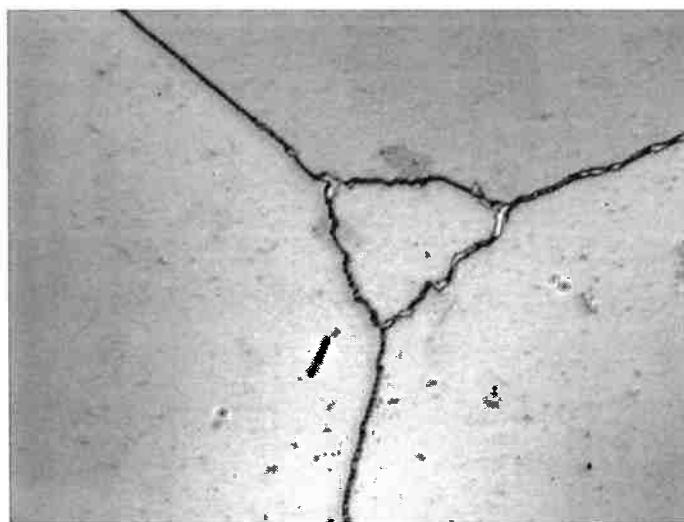


Figura 44 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 10 minutos. Observa-se um recobrimento completo dos contornos de grãos de austenita pela re-precipitação de carbonetos. Ataque Nital 3%. Aumento 1000x.

A microestrutura obtida pelo tratamento isotérmico a 750°C por tempo de 10 minutos apresenta precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Tal precipitação apresenta uma forma contínua, pois os carbonetos precipitados criam uma rede de filme contínuo que envolve os grãos de austenita.

Os ensaios Charpy realizados para este nível de re-precipitação, obtido após tratamento isotérmico pelo tempo de 10 minutos, são apresentados na Tabela 10, a seguir.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo após o tempo de residência de 10 minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

Número	Energia Impacto (J)
1	24,5
2	20,6
3	21,6
4	27,5
Média	23,55

O valor de 23J, obtido a partir da média de valores do ensaio de resistência ao impacto para os corpos de provas ensaiados, apresenta uma ordem de grandeza consideravelmente menor que ao valor obtido pelos corpos de prova no estado solubilizado (180J). O valor de energia absorvida, durante o ensaio do tipo Charpy, indica uma perda significativa de resistência ao impacto devido à presença deste nível de re-precipitação.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado de 10 minutos de tratamento isotérmico a 750°C é apresentada na Figura 45, a seguir.

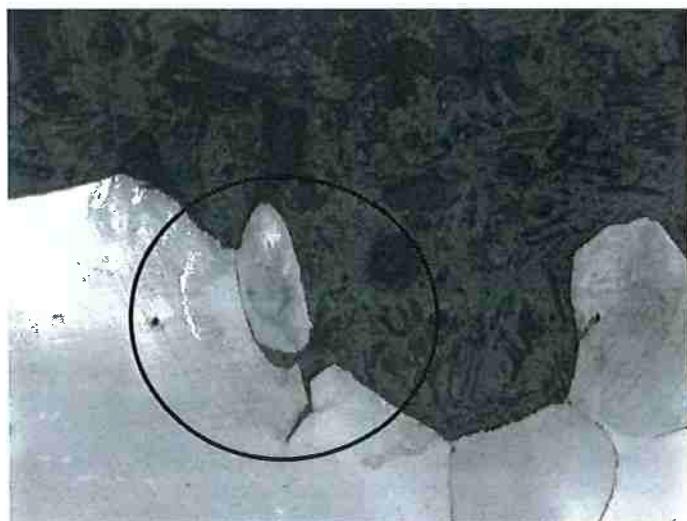


Figura 45 - Micrografia do corte longitudinal de uma corpo de prova, no estado de 10 minutos a 750°C, após a realização de ensaio Charpy. Nota-se uma fratura mais faceada que acompanha os formatos dos grãos austeníticos. Em detalhe a trinca "caminhando" preferencialmente pela região de contornos de grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

A microestrutura, obtida após o tratamento isotérmico de 750°C com dez minutos de tempo de residência, apresenta uma rede contínua de carbonetos precipitados em contornos de grãos. Assim, os grãos de austenita encontram-se envolvidos por uma camada contínua de carbonetos precipitados ao longo dos contornos de grãos.

O resultado de resistência ao impacto, apresentado pelos ensaios de impactos do tipo Charpy, indicam uma perda significativa do valor de energia absorvida pela presença de carbonetos precipitados na forma contínua ao longo dos contornos de grãos.

3.3.5) Tempo de residência de 20 minutos

As figuras 46, 47 e 48 apresentam as micrografias obtidas da placa tratada isotermicamente pelo tempo de 20 minutos a temperatura de 750°C, com diferentes aumentos.

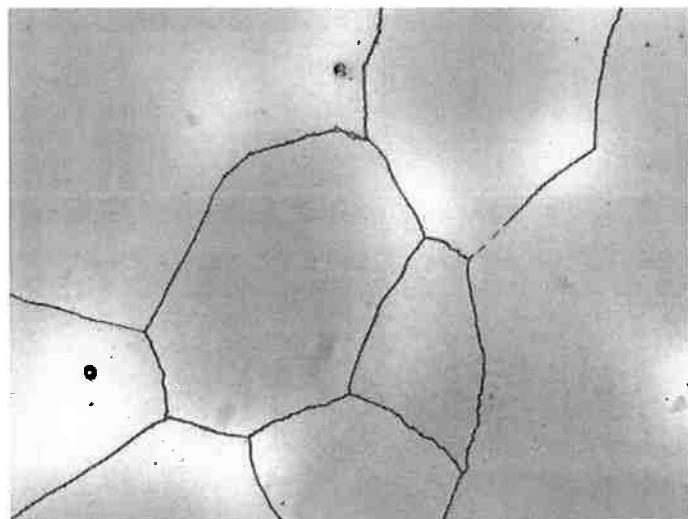


Figura 46 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 20 minutos. Apresenta grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

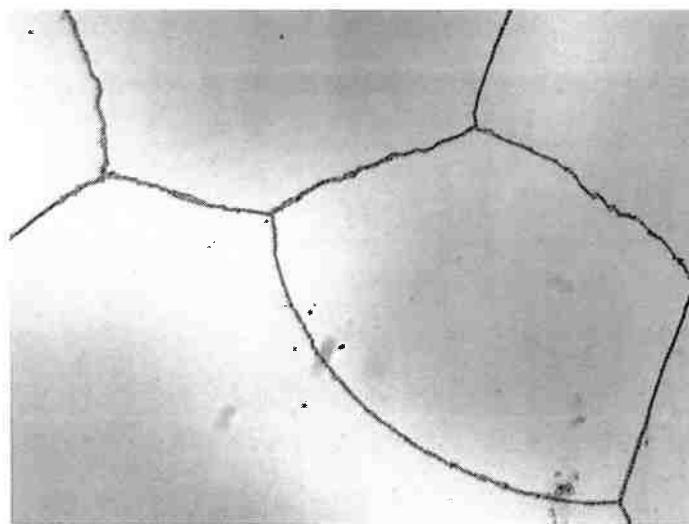


Figura 47 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 20 minutos. Grãos de austenita apresentam re-precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grãos com um aspecto contínuo. Ataque Nital 3%. Aumento 500x.

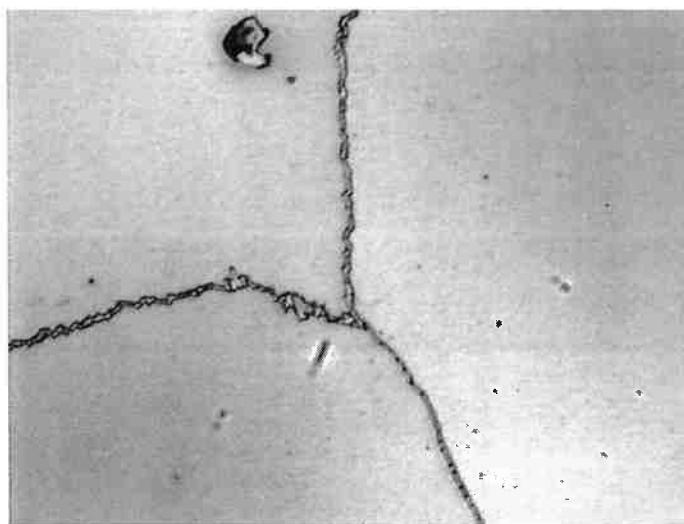


Figura 48 - Microestrutura de um aço ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo mantido na temperatura de 750°C pelo tempo de 20 minutos. Observa-se um recobrimento completo dos contornos de grãos de austenita pela re-precipitação de carbonetos. Ataque Nital 3%. Aumento 1000x.

A microestrutura obtida pelo tratamento isotérmico a 750°C por tempo de 20 minutos apresenta precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Tal precipitação apresenta uma forma contínua, pois os carbonetos precipitados criam uma rede de filme contínuo que envolve os grãos de austenita.

Os ensaios Charpy realizados para este nível de re-precipitação, obtido após tratamento isotérmico pelo tempo de 20 minutos, são apresentados na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de impacto de um aço Hadfield com alto teor de cromo após o tempo de residência de 20 minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

Número	Energia Impacto (J)
1	11,8
2	12,7
3	9,8
4	9,8
Média	11,03

O valor de 11J, obtido a partir da média de valores do ensaio de resistência ao impacto para os corpos de provas ensaiados, apresenta uma ordem de grandeza consideravelmente menor que ao valor obtido pelos corpos de prova no estado solubilizado (180J). O valor de energia absorvida, durante o ensaio do tipo Charpy, indica uma perda significativa de resistência ao impacto devido à presença deste nível de re-precipitação.

A micrografia do corte transversal de um corpo de prova no estado de 20 minutos de tratamento isotérmico a 750°C é apresentada na Figura 49, a seguir.

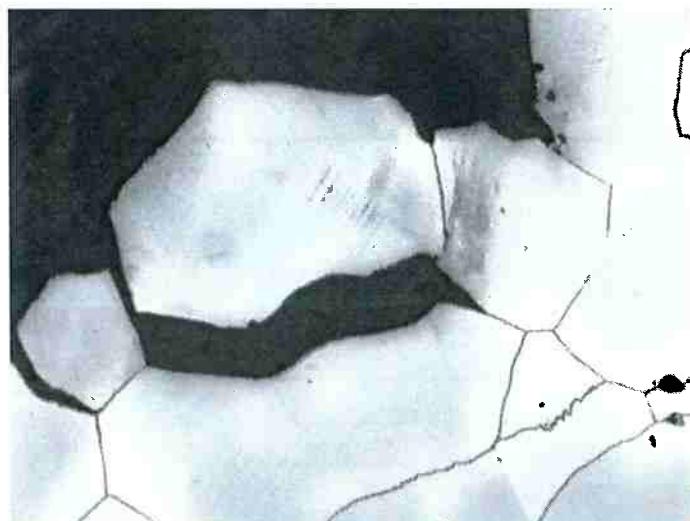


Figura 49 - Micrografia do corte longitudinal de uma corpo de prova, no estado de 20 minutos a 750°C, após a realização de ensaio Charpy. Nota-se uma fratura que acompanha os formato dos grãos austeníticos que promove o arrancamento dos grãos. Ataque Nital 3%. Aumento 125x.

A microestrutura, obtida após o tratamento isotérmico de 750°C com vinte minutos de tempo de residência, apresenta uma rede contínua de carbonetos precipitados em contornos de grãos. Assim, os grãos de austenita encontram-se envolvidos por uma camada contínua de carbonetos precipitados ao longo dos contornos de grãos.

O resultado de resistência ao impacto, apresentado pelos ensaios de impactos do tipo Charpy, indicam uma perda significativa do valor de energia absorvida pela presença de carbonetos precipitados na forma contínua ao longo dos contornos de grãos.

A Tabela 12 apresenta um resumo das energias absorvidas para cada tempo de residência a temperatura de 750°C testados neste trabalho.

Tabela 12 - Resumo dos resultados de ensaio de impacto obtidos com os diferentes tempos de residência no tratamento isotérmico a temperatura de 750°C.

Resultados de absorção de impacto para diferentes tempos de tratamentos isotérmicos a temperatura de 750°C						
Impacto Absorvido (J)	Solubilizado	1 min	2 min	5 min	10 min	20 min
	178	186	182	58	24	11

A necessidade de melhor entender as diferenças, que a presença de carbonetos precipitados na forma contínua e descontínua nos contornos de grãos, causadas na resistência ao impacto dos aços austeníticos ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo e compreender a morfologia e cinética de re-

precipitação de carbonetos, que algumas amostras foram encaminhadas para a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.4) Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O gráfico que relaciona a resistência ao impacto com o tempo de residência no tratamento isotérmico a 750°C é apresentado na Figura 50, a seguir.

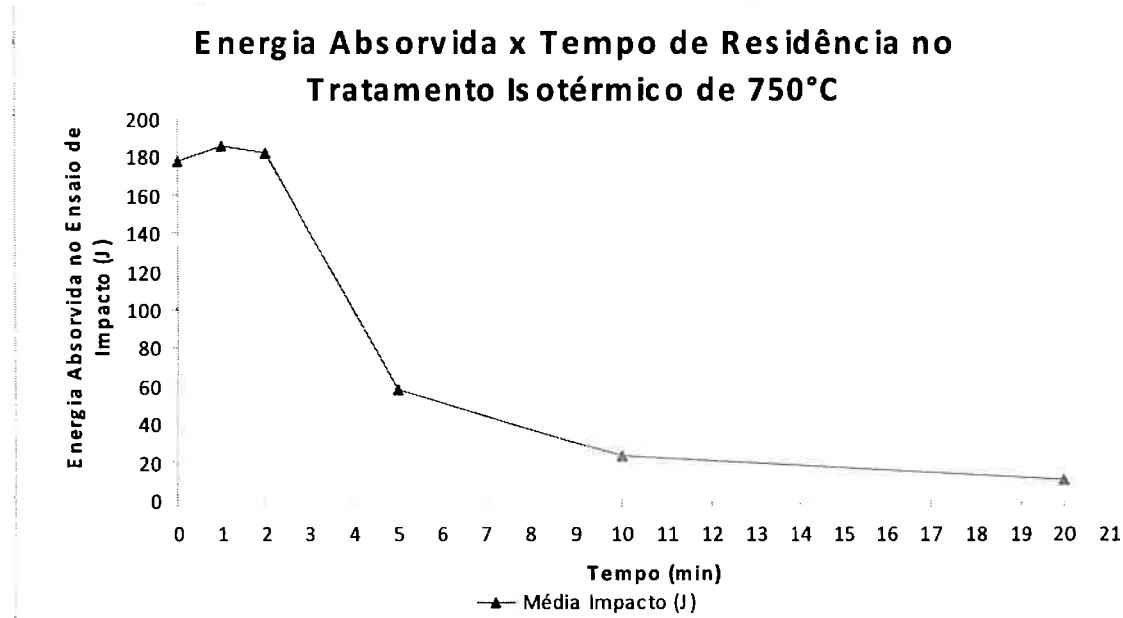


Figura 50 - Gráfico que relaciona a energia absorvida de impacto com o tempo de residência no tratamento isotérmico a 750°C.

A Figura 50 mostra a presença de um patamar no valor de 180J para as amostras solubilizadas e com tempos de residência menor que dois minutos e que para as amostras com tempos de residência maiores que cinco minutos, os valores de energia absorvida sofrem uma queda para o nível de 60J, ou seja, as amostras com tempos de residências maiores que 5 minutos apresentam uma redução de três vezes o valor do patamar atingido pelas amostras solubilizadas.

Pegaremos uma amostra que apresentou valor de energia absorvida no patamar de 180J e outra com valor de energia absorvida menor que 60J para analisarmos o mecanismo envolvido na fratura dos corpos de prova e a microestrutura dos mesmos com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura.

3.4.1 Mecanismo de fratura

As Figuras 51 e 52 mostram o aspecto de um corpo de prova fraturado com valor de energia de impacto absorvida de 204J e o tempo de residência de um minuto no tratamento isotérmico a 750°C.

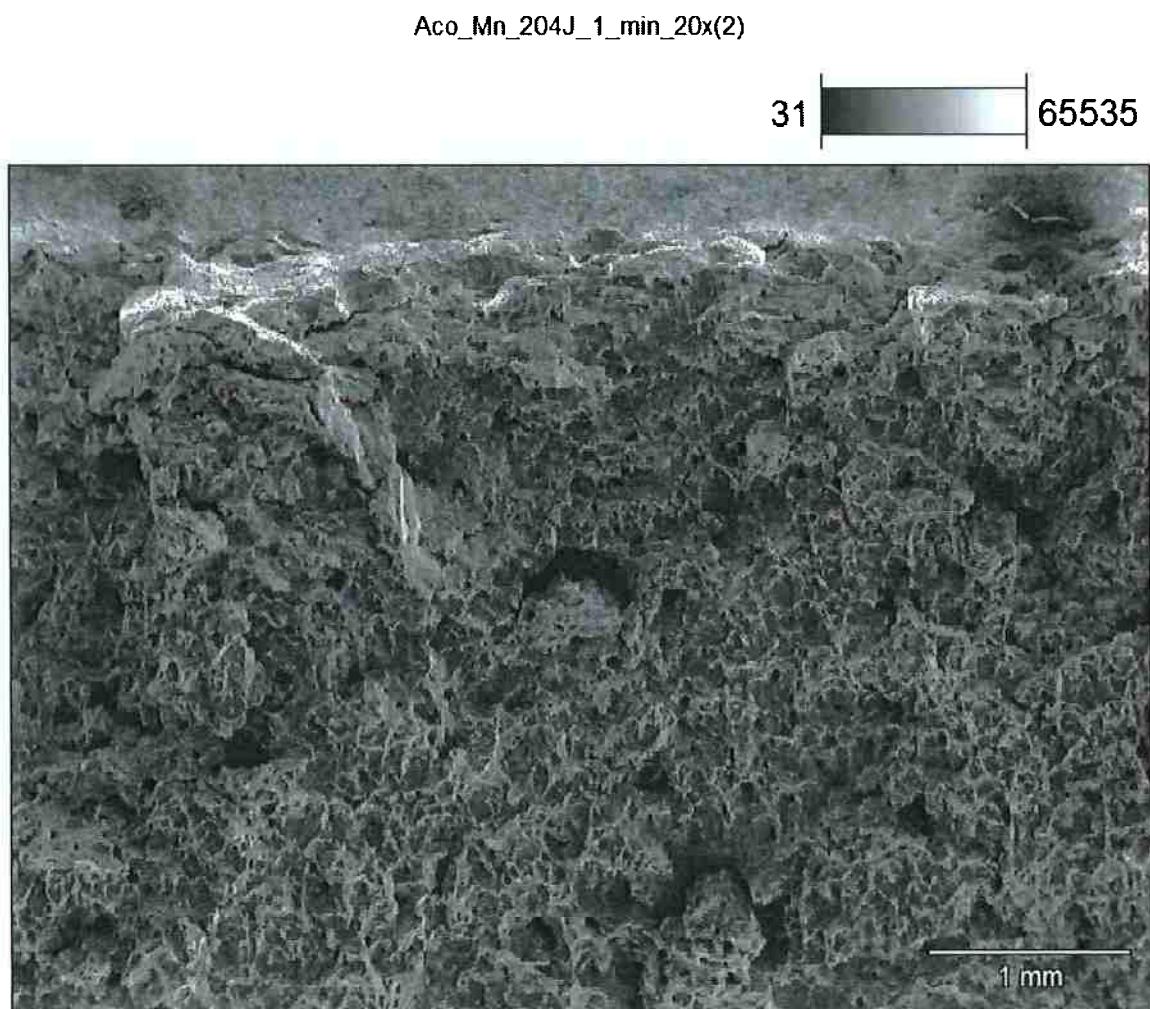


Figura 51 - Aspecto da fratura de um corpo de prova com tempo de residência de 1 minuto a 750°C e 204J de energia absorvida. (MEV) Aumento 20x.

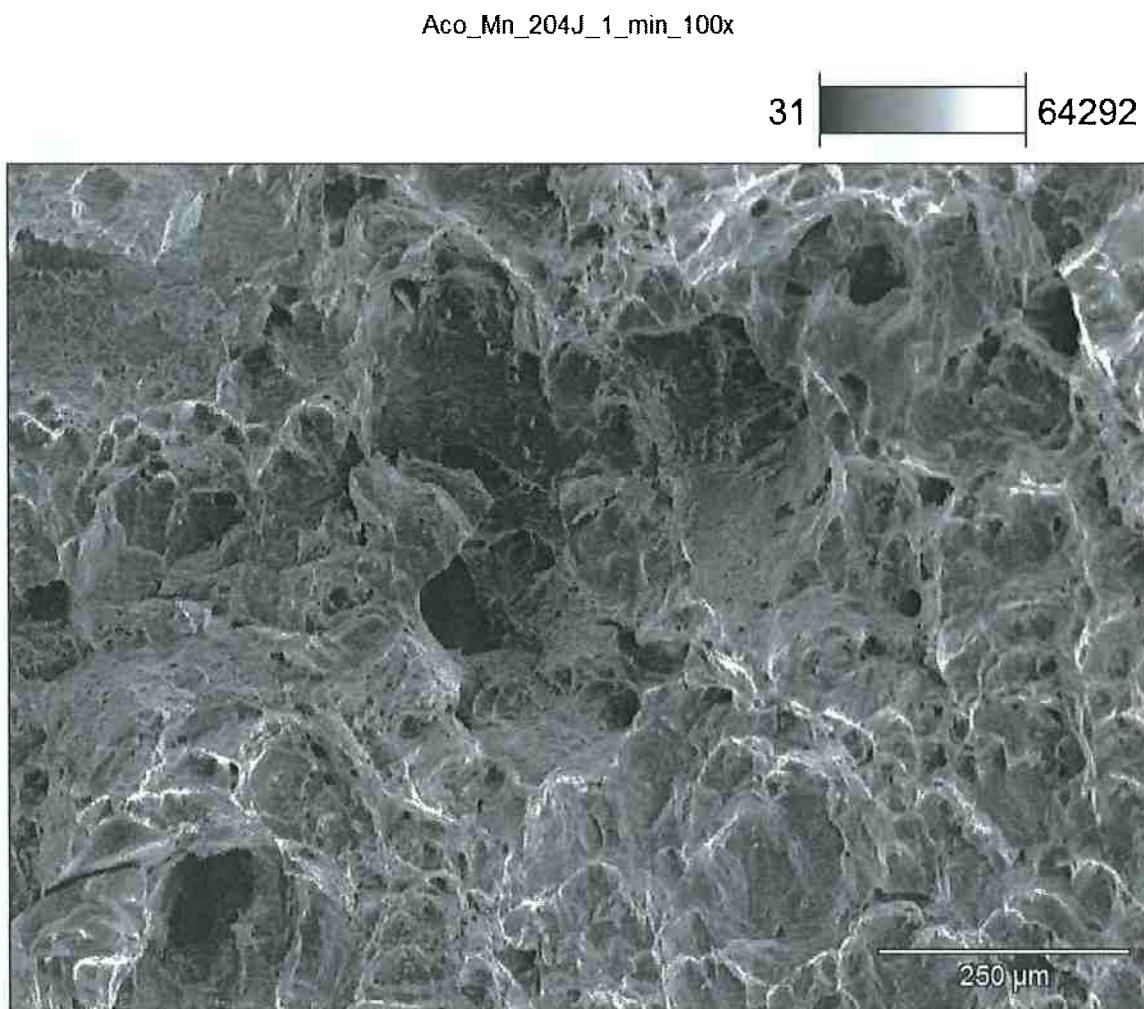


Figura 52 - Aspecto da fratura de um corpo de prova com tempo de residência de 1 minuto a 750°C e 204J de energia absorvida. (MEV) Aumento 100x.

Observa-se uma fratura que apresenta regiões com a presença de poros e regiões que sofreram deformações durante o ensaio de impacto. Tais características indicam um mecanismo de fratura dúctil.

As Figuras 53 e 54 mostram o aspecto de um corpo de prova fraturado com valor de energia de impacto absorvida de 10J e o tempo de residência de vinte minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

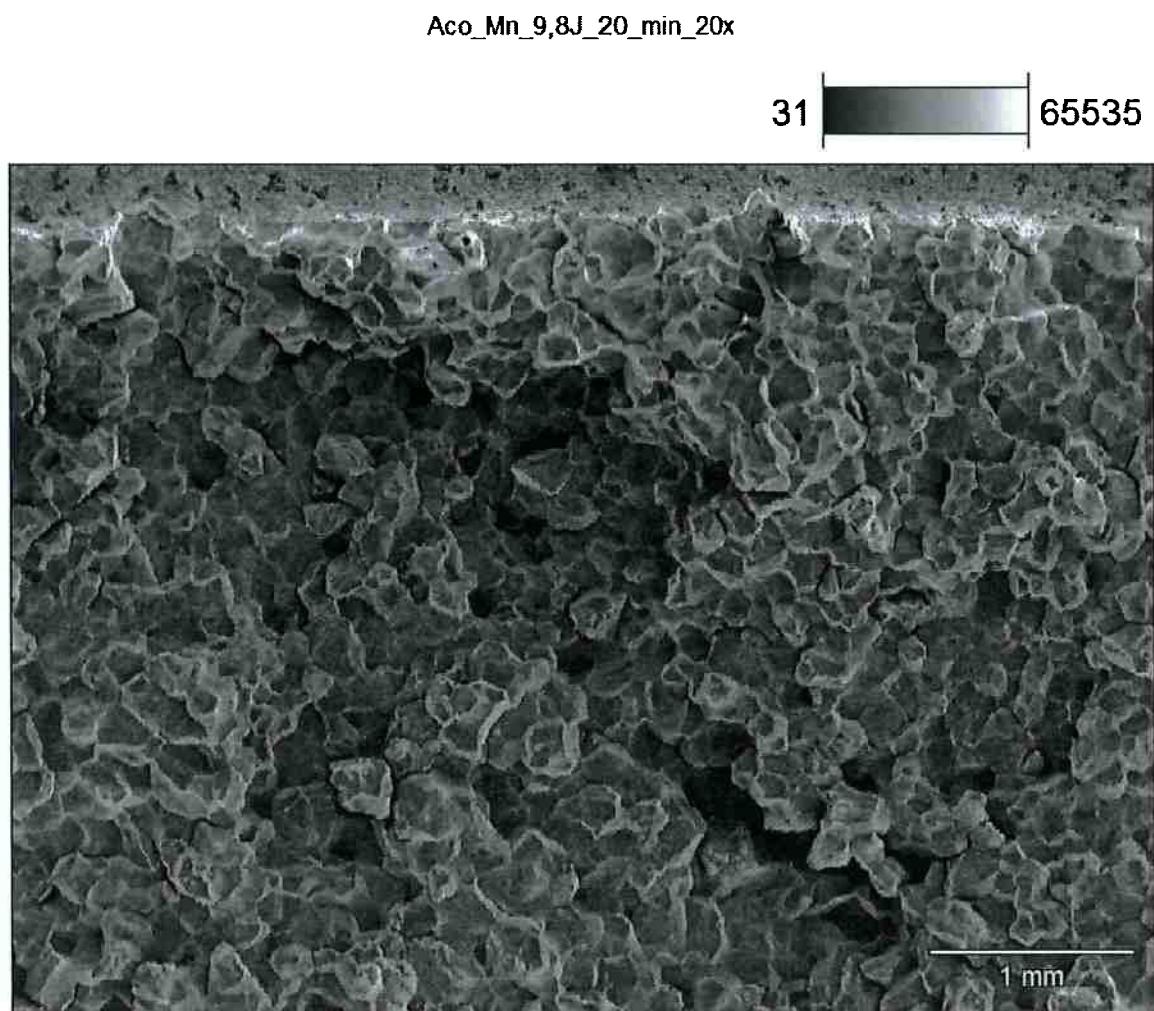


Figura 53 - Aspecto da fratura de um corpo de prova com tempo de residência de 20 minutos a 750°C e 10J de energia absorvida. (MEV) Aumento 20x.

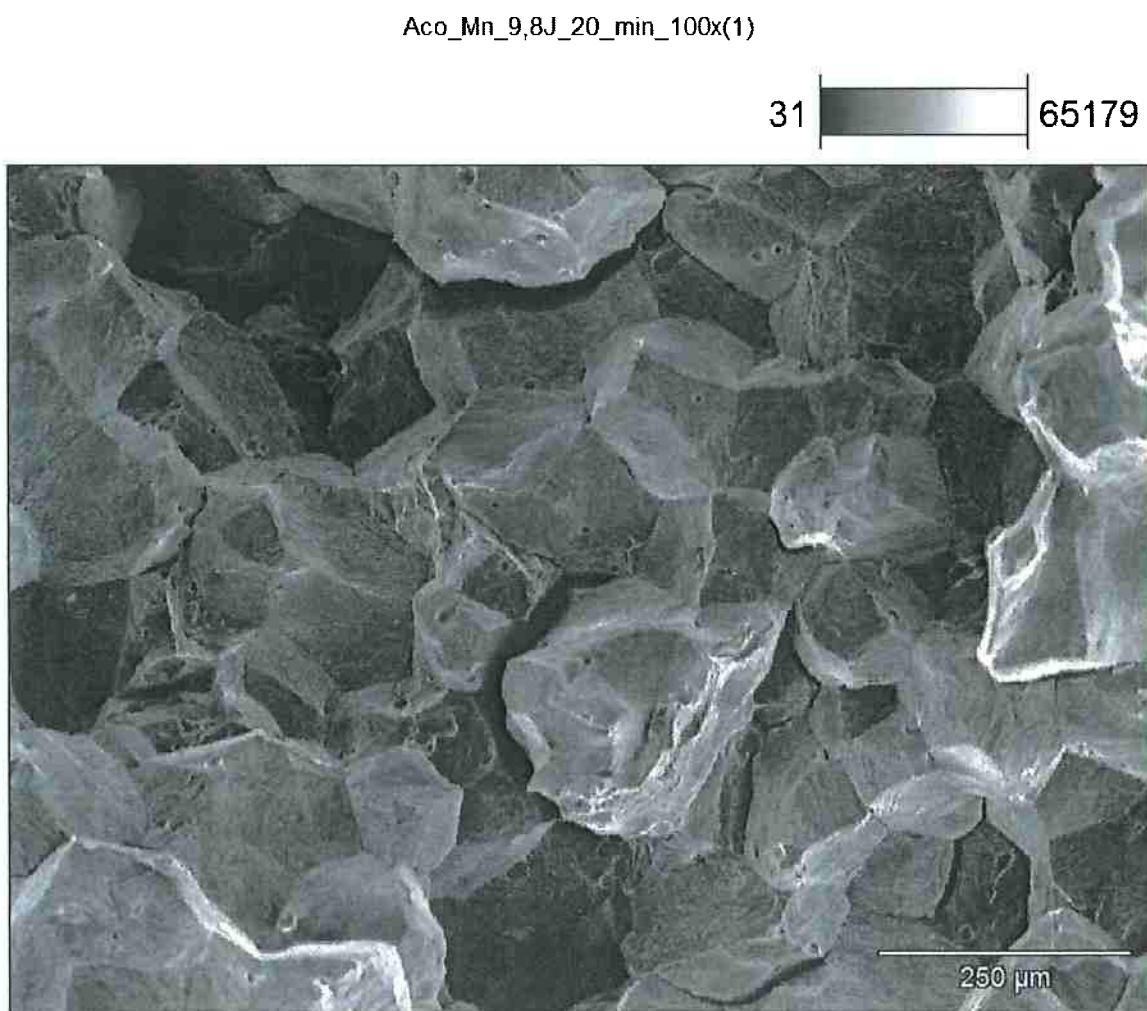


Figura 54 - Aspecto da fratura de um corpo de prova com tempo de residência de 20 minutos a 750°C e 10J de energia absorvida. (MEV) Aumento 100x.

Observa-se uma fratura que apresenta regiões com porosidade e um aspecto intergranular. Tais fatos indicam a ocorrência de um mecanismo de fratura frágil (intergranular).

Os resultados mostraram que amostras com um elevado valor de energia absorvida (maiores que 180J) apresentam um mecanismo de fratura dúctil e

amostras com baixo nível de energia absorvida (menores que 60J) apresentam um mecanismo de fratura frágil.

3.4.2) Microestrutura

As figuras 55 a 57 mostram a microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto absorvida de 190J e o tempo de residência de dois minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

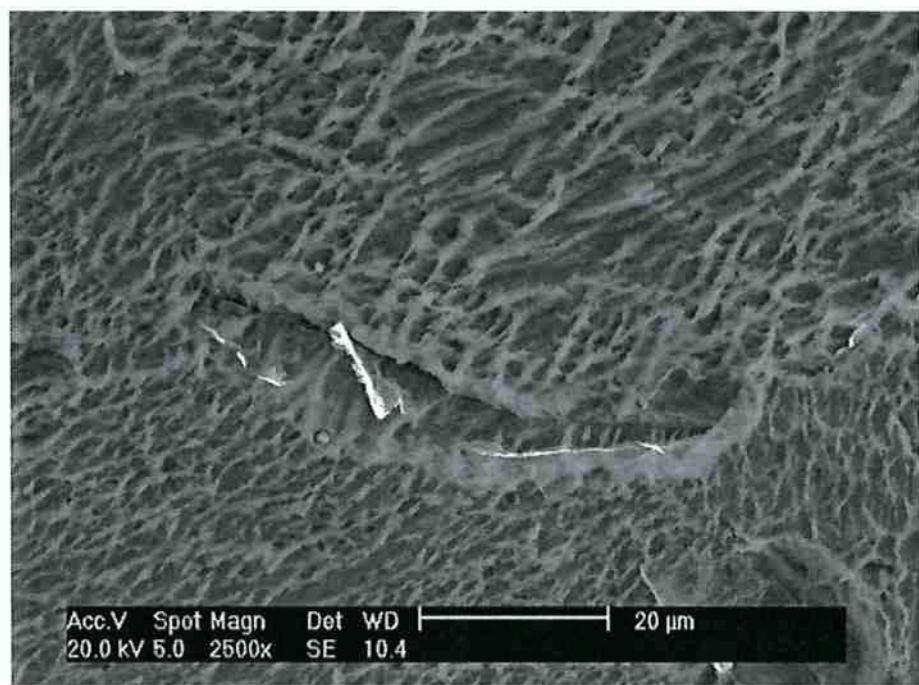


Figura 55 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 190J e tempo de residência de 2 minutos a 750°C. Apresenta carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma decontínua. Ataque profundo. (MEV) Aumento 2500x.

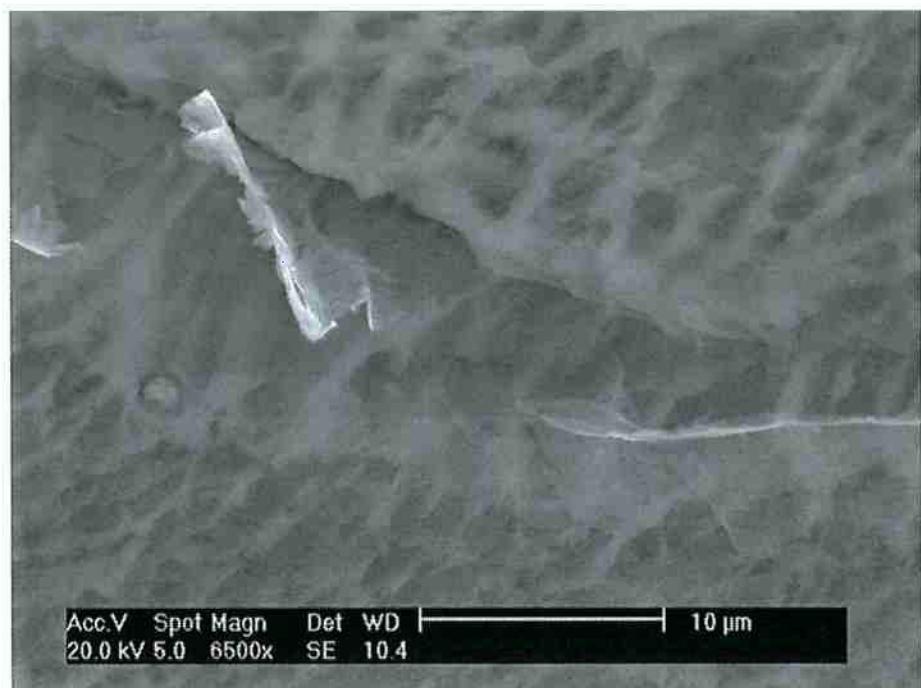


Figura 56 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 190J e tempo de residência de 2 minutos a 750°C. Apresenta carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma decontínua. Ataque profundo. (MEV) Aumento 6500x.



Figura 57 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 190J e tempo de residência de 2 minutos a 750°C. Apresenta carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma decontínua e a morfologia dendrítica dos carbonetos. Ataque profundo. (MEV) Aumento 8000x.

Os resultados mostram que os corpos de prova com elevado valor de energia absorvida (maior que 180J) apresentam uma microestrutura constituída de grãos austeníticos e com a presença de re-precipitação de carbonetos em contornos de

grãos na forma descontínua e um aspecto dendrítico. A presença de re-precipitação descontínua de carbonetos em contornos de grãos não influencia a resistência ao impacto.

As figuras 58 a 60 mostram a microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto absorvida de 10J e o tempo de residência de vinte minutos no tratamento isotérmico a 750°C.

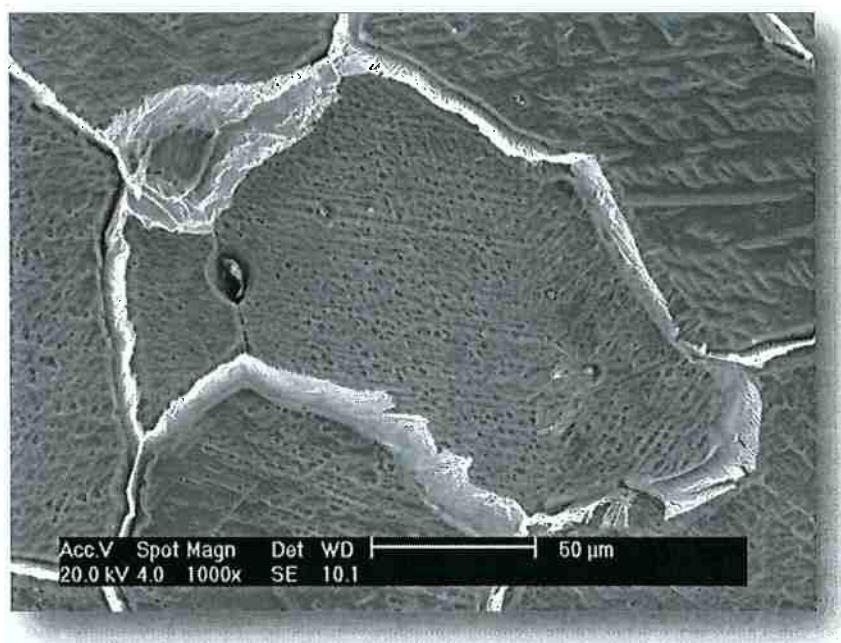


Figura 58 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 10J e tempo de residência de 20 minutos a 750°C. Apresenta carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma contínua. Ataque profundo. (MEV) Aumento 1000x.

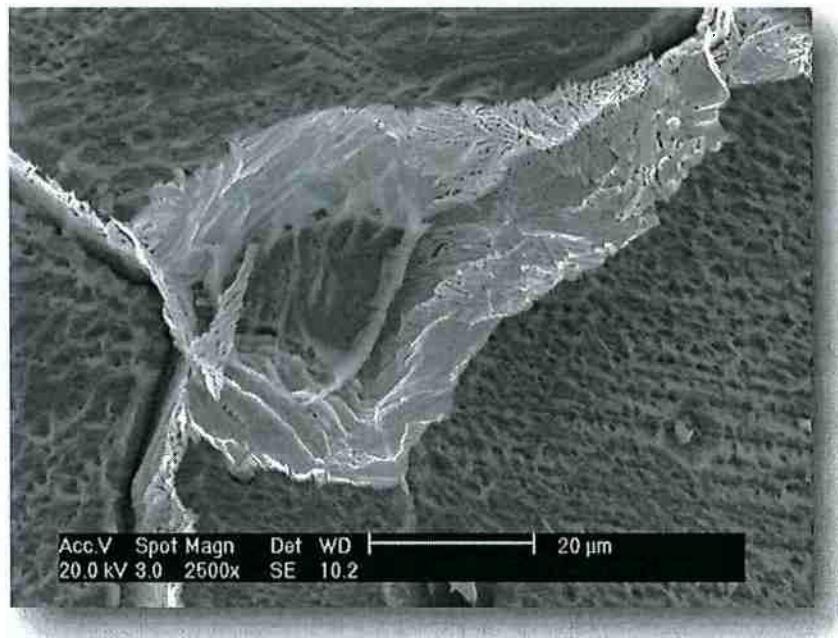


Figura 59 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 10J e tempo de residência de 20 minutos a 750°C. Apresenta carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma contínua e envolvem completamente os grãos de austenita.. Ataque profundo. (MEV) Aumento 2500x.

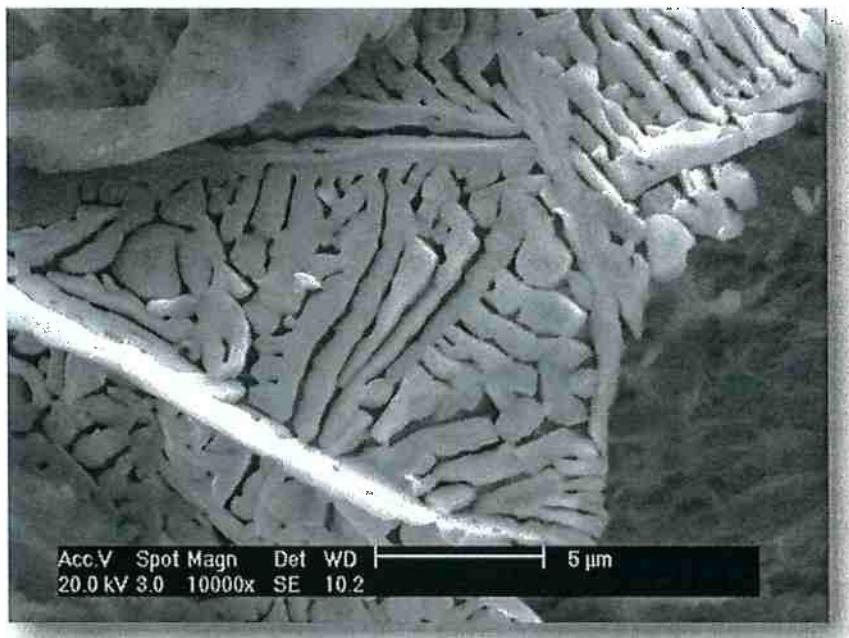


Figura 60 - Microestrutura de um corpo de prova com valor de energia de impacto de 10J e tempo de residência de 20 minutos a 750°C. Apresenta o detalhe da morfologia dendrítica dos carbonetos precipitados em contornos de grãos na forma contínua. Ataque profundo. (MEV) Aumento 10000x.

Os resultados mostram a influência da precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua na resistência ao impacto dos aços Hadfield com alto teor de cromo que foram tratados isotermicamente por 20 minutos a 750°C. Tal fato é devido a presença de carbonetos em contornos de grãos que formam uma rede contínua ao redor dos grãos de austenita e diminuem o grau de coesão entre os grãos, proporcionando uma baixa energia absorvida de impacto através de um mecanismo de fratura intergranular (fratura frágil).

4) CONCLUSÕES

A temperatura na qual ocorre a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos é de 750°C. Nesta temperatura, o aço austenítico do tipo Hadfield com alto teor de cromo forma uma rede contínua de carbonetos precipitados nos contornos de grãos de austenita que apresenta uma morfologia semelhante aos carbonetos precipitado durante o resfriamento lento das peças após tratamento térmico de solubilização.

A cinética de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos é muito rápida, pois apresenta o início de precipitação em tempos menores que um minuto. Porém o efeito da re-precipitação destes carbonetos só irá afetar significativamente tenacidade da microestrutura austenítica, característica deste aço, quando apresentar uma quantidade suficiente de carbonetos a promover uma rede contínua de precipitação nos contornos de grãos.

Tal fato nos permite estipular uma curva TTT onde a partir das micrografias obtidas pelos tratamentos isotérmicos na faixa de temperatura de re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos, podemos identificar o início da precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua, que são prejudiciais a tenacidade dos aços Hadfield.

A Figura 61 mostra uma representação da curva TTT para um aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo.

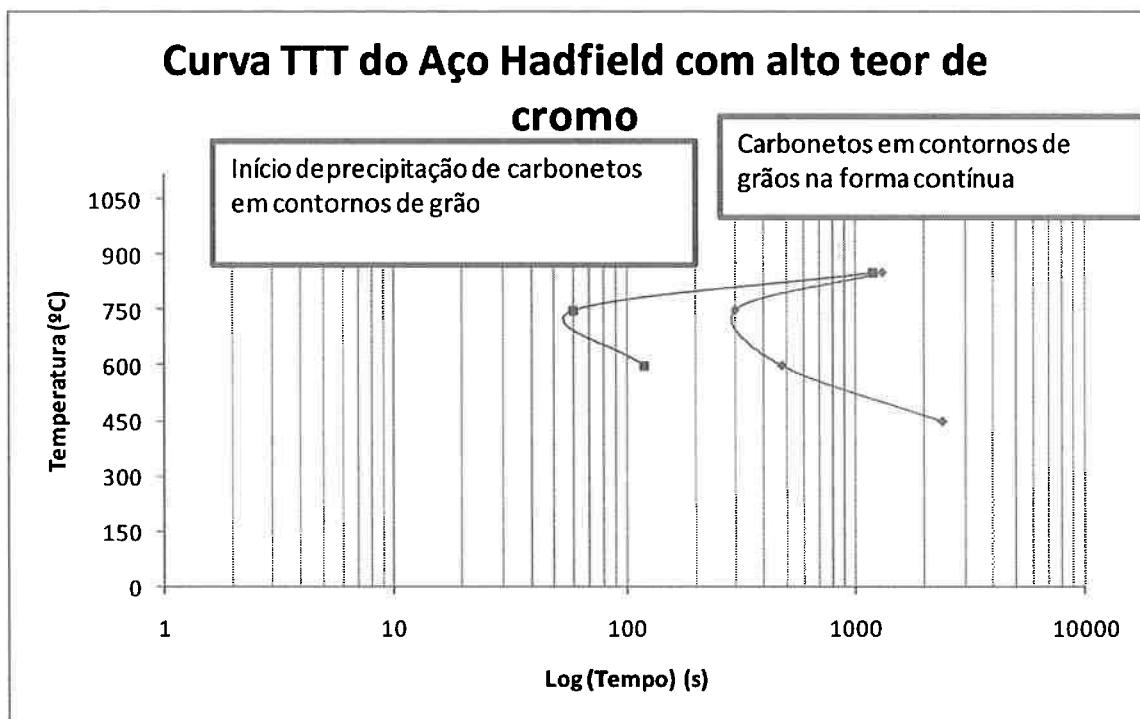


Figura 61 - Curva TTT do aço austenítico ao manganês do tipo Hadfield com alto teor de cromo.

5) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tasker, J. (1983). Austenitic Manganese Steel - Faact and Fallacy. *Proceedings of 1983 Annual Conference SCRATA*.
2. Avery, H. S. (1974). Work Hardening in Relation to Abrasion Resistance. *Symposium of Materials for the Mining Industry*, (pp. 43-78).
3. ASM Metals Handbook. (1993). *Properties and Selection of Iron, steels and High Performance Alloys* (Vol. 1). 1951-2003.
4. Fuoco, R. (2007). Processo de Produção de Componentes em Aços ao Manganês Austeníticos do Tipo Hadfield. *13º Congresso de Fundição - CONAF 2007*.
5. Tsujimoto, N. (1979). Casting Practice of Abrasion Resistant Austenitic Manganese Steel. *AFS International Cast Metals Journal*, (pp. 62-77).
6. Kuyucak, S. Z. (2001). Heat Treatment of Hadfield's Austenitic Manganese Steels Part I - VIII. *AFS International Cast Metals Journal*.
7. Norman, T. D. (1960). Austenitic Manganese Steels - Some Metallurgical Factors Influence. *AFS Transactions* , 68, 287 - 300.
8. Avery, H. a. (1954). Austenitic Manganese Steel Welding Eletrodes. *The Welding Journal* , 33.
9. Avery, H. S. (1948). Austenitic Manganese Steel. In *ASM Metals Handbook*.
10. Maratay, F. (1995). *High Carbon Manganese Austenitic Steels*. Paris, France.

6) ANEXO A

Etapa de estudos iniciais para a determinação da temperatura de tratamento isotérmico que apresenta a re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos com a morfologia semelhante ao encontrado na peça que sofreram re-precipitação de carbonetos durante a etapa de resfriamento, após tratamento térmico de solubilização.

Um resumo das temperaturas e tempos de residência dos tratamentos isotérmicos realizados nas amostras cúbicas é apresentado na Tabela , a seguir.

Tabela 13 - Resumo das temperaturas e tempos de residência dos tratamentos isotérmicos realizados com as amostras cúbicas.

Amostras cúbicas	
Temperatura (°C)	Tempos de residência (minutos)
450	1
	5
	15
	40
600	2
	4
	6
	8
	10
	12
	15
	40
750	1
	2
	5
	10
	15
	20
	25
	35
850	1
	5
	15
	30

Assim, os resultados desta etapa serão apresentados para cada temperatura de tratamento isotérmico testada e seus tempos de residência que apresentaram uma mudança significativa na microestrutura austenítica, resultante da etapa de solubilização.

450°C

Os tempos de residência testados durante o tratamento isotérmico a 450°C foram de 1, 5, 15 e 40 minutos. As figuras 62 a 65 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas nesta temperatura de 450°C para os tempos indicados.

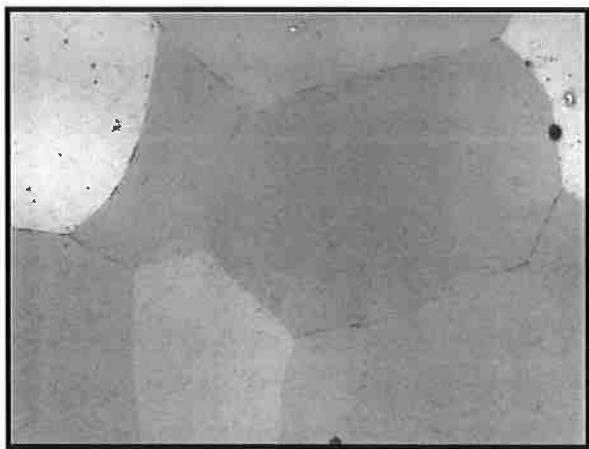


Figura 62 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 450°C pelo tempo de 1 minuto. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

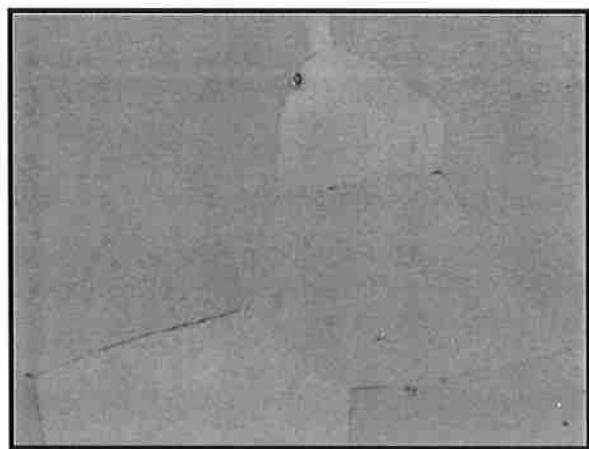


Figura 63 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 450°C pelo tempo de 5 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

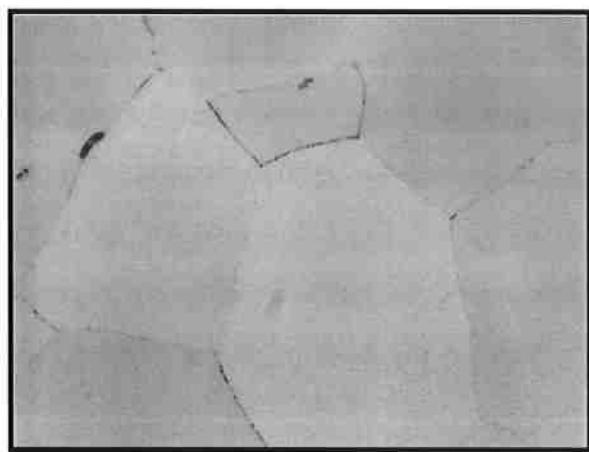


Figura 64 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 450°C pelo tempo de 15 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

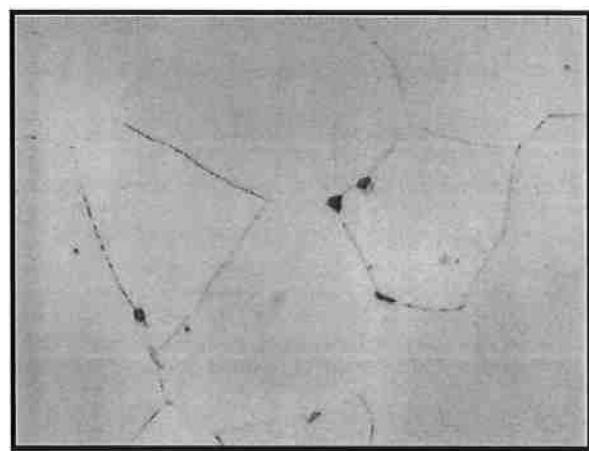


Figura 65 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 450°C pelo tempo de 40 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

A temperatura de 450°C não apresentou precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma contínua, para os tempos de residência testados.

600°C

Os tempos de residência testados durante o tratamento isotérmico a 600°C foram de 2, 4, 8, 15 e 40 minutos. As figuras 66 a 70 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas nesta temperatura de 600°C para os tempos indicados.

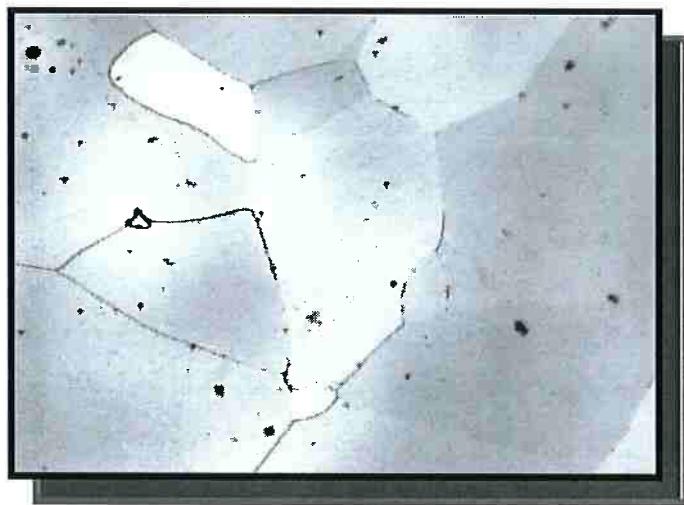


Figura 66 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 600°C pelo tempo de 2 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

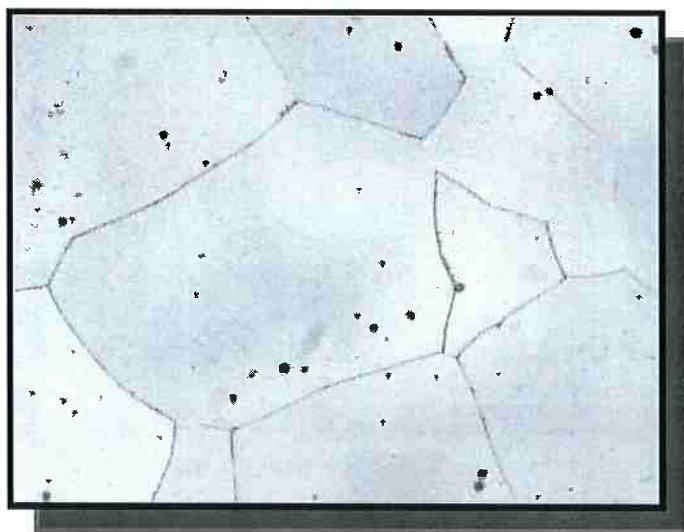


Figura 67 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 600°C pelo tempo de 4 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

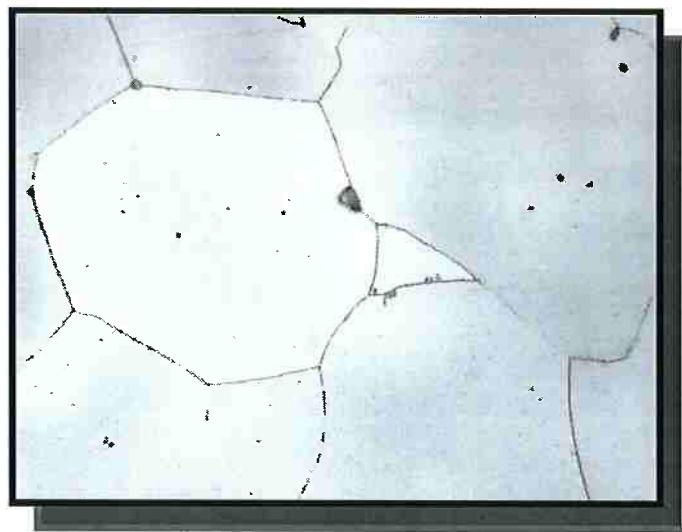


Figura 68 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 600°C pelo tempo de 8 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua e de carbonetos de fromato acicular. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

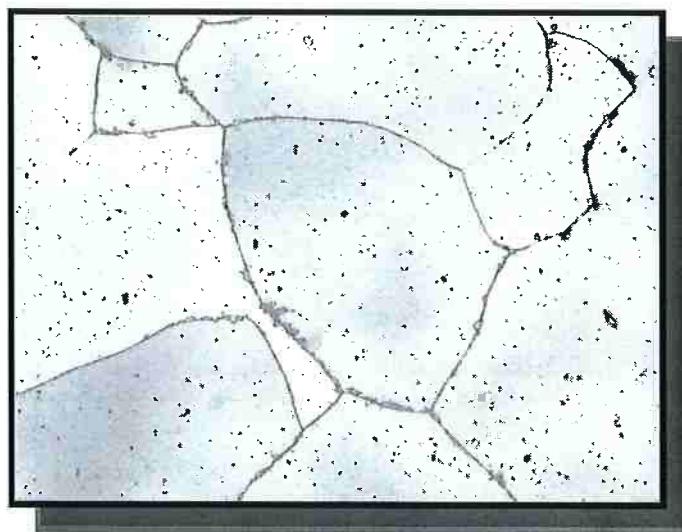


Figura 69 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 600°C pelo tempo de 15 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

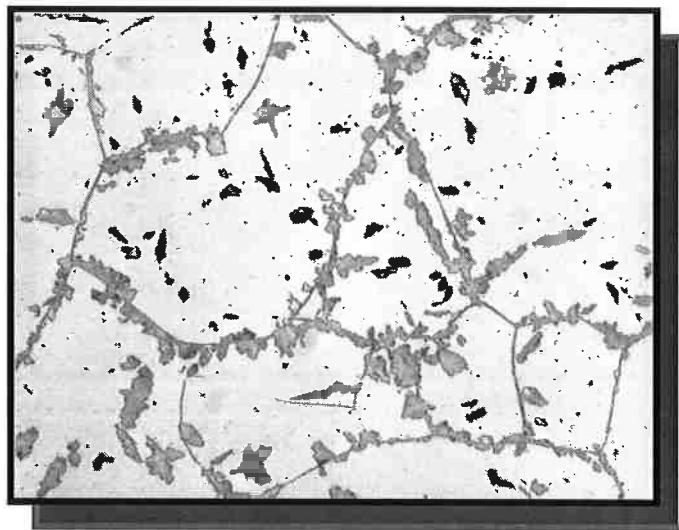


Figura 70 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 600°C pelo tempo de 40 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos que aparecem crescer em direção da matriz austenítica. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

A temperatura de 600°C apresenta precipitação de carbonetos em contornos de grãos, porém de morfologia distinta dos carbonetos re-precipitados em contornos de grãos gerados pelo resfriamento lento dos componentes em aço Hadfield, após tratamento térmico de solubilização.

750°C

Os tempos de residência testados durante o tratamento isotérmico a 750°C foram de 1, 2, 5, 10, 20 e 35 minutos. As figuras 71 a 76 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas nesta temperatura de 750°C para os tempos indicados.

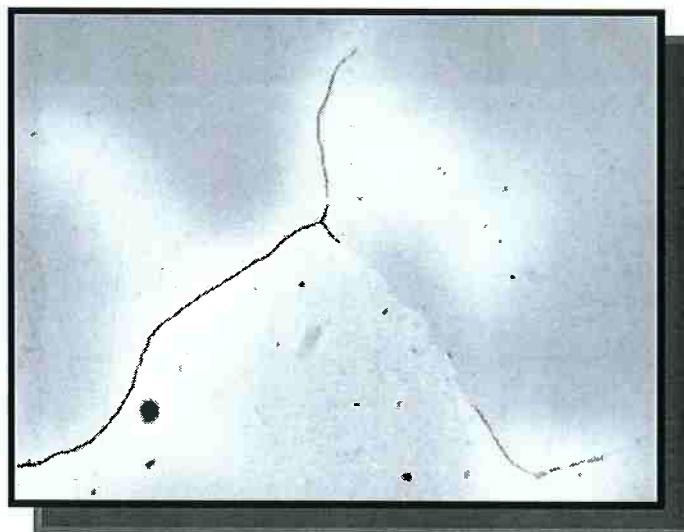


Figura 71 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 1 minuto. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

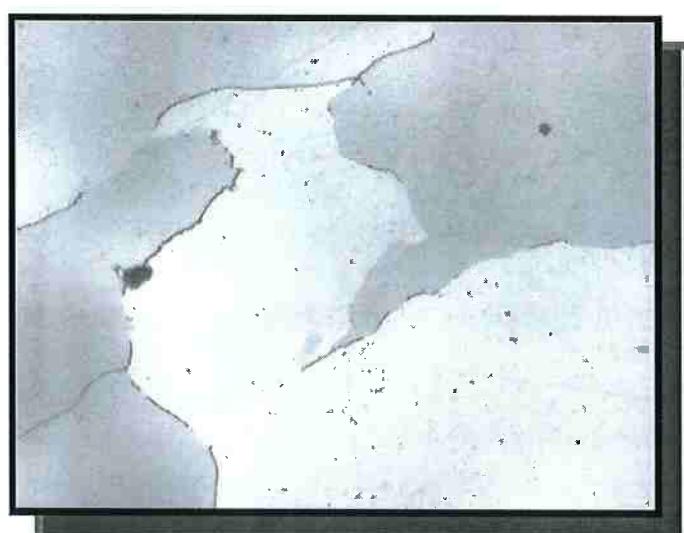


Figura 72 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 2 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma descontínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

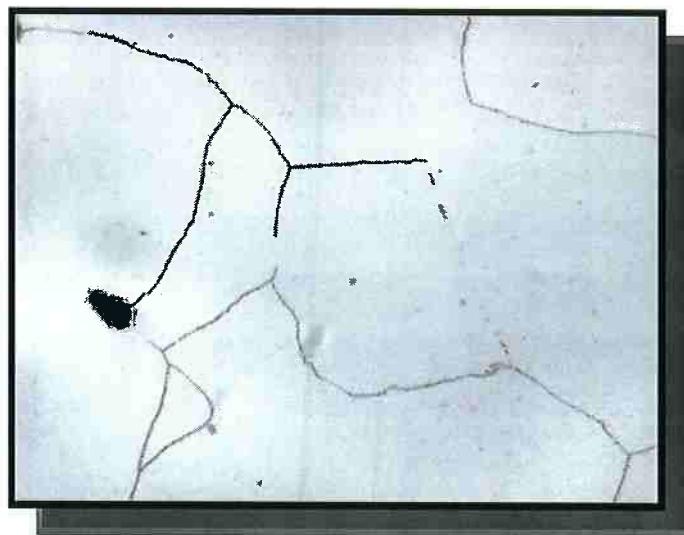


Figura 73 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 5 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma, praticamente, contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

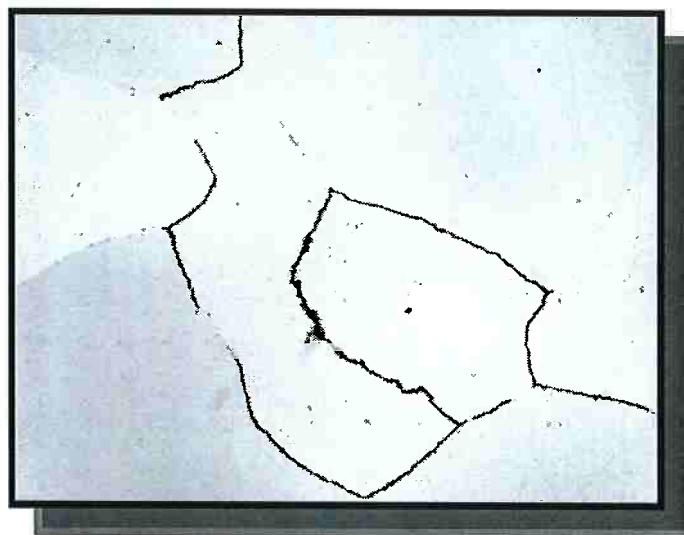


Figura 74 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 10 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma, praticamente, contínua.. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

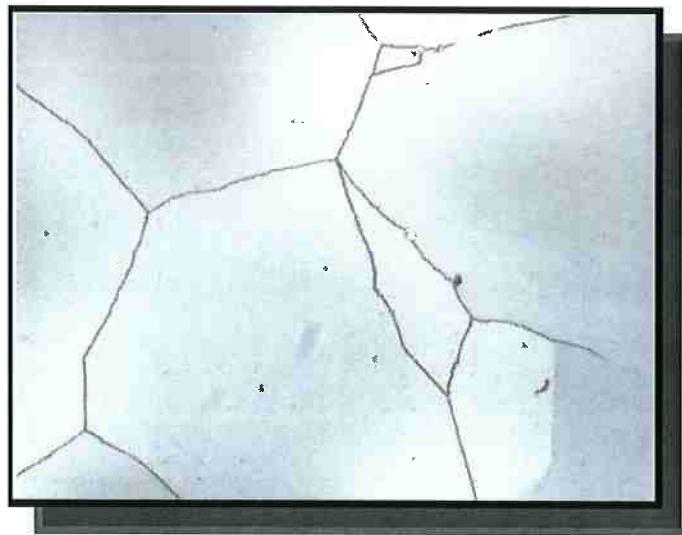


Figura 75 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 20 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos que formam uma rede contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

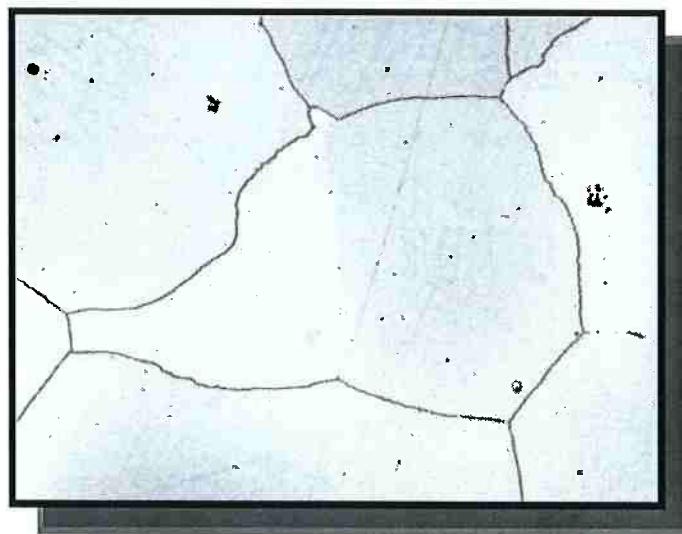


Figura 76 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 750°C pelo tempo de 35 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos que formam uma rede contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

A temperatura de 750°C apresentou uma precipitação de carbonetos em contornos de grãos com morfologia muito semelhante ao encontrado em componentes que sofreram re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos durante resfriamento

850°C

Os tempos de residência testados durante o tratamento isotérmico a 850°C foram de 1, 5, 15 e 30 minutos. As figuras 77 a 80 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas nesta temperatura de 850°C para os tempos indicados.

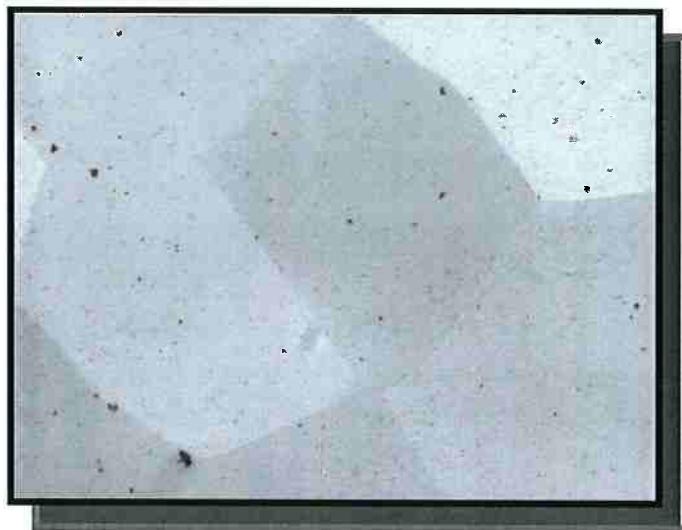


Figura 77 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 850°C pelo tempo de 1 minuto. Nota-se a presença de grãos de austenita livres de precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Ataque Nita 3%. Aumento 250x.

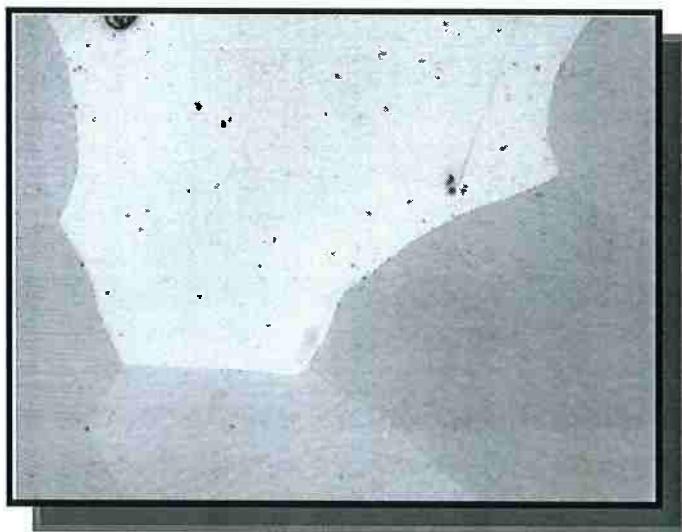


Figura 78 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 850°C pelo tempo de 5 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita livres de precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Ataque Nita 3%. Aumento 250x.

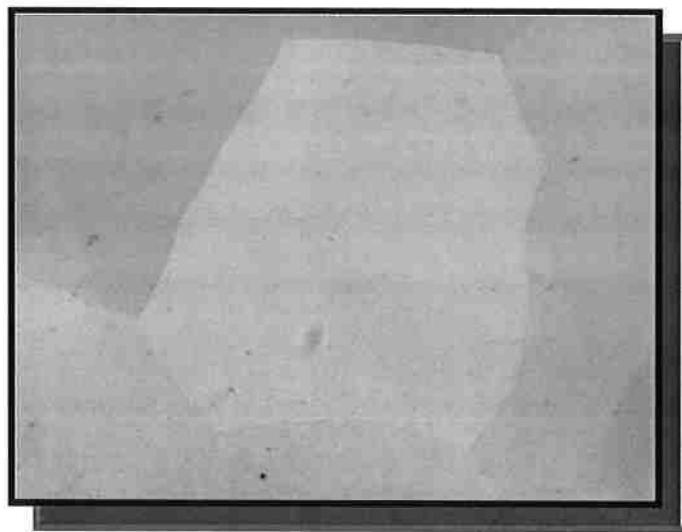


Figura 79 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 850°C pelo tempo de 15 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita livres de precipitação de carbonetos em contornos de grãos. Ataque Nita 3%. Aumento 250x.

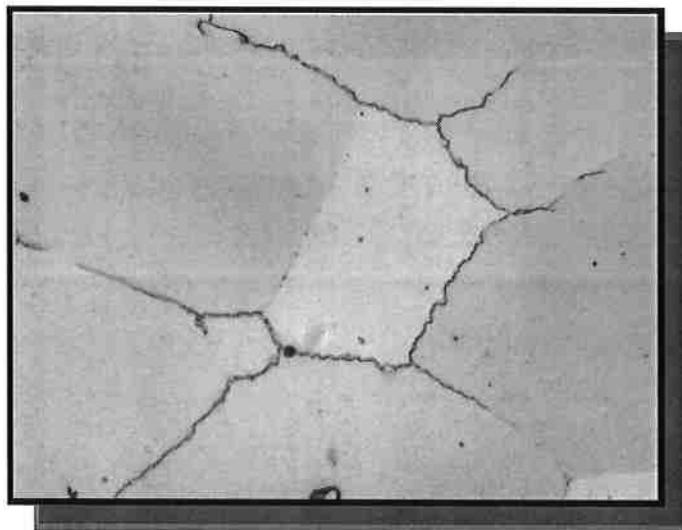


Figura 80 - Microestrutura de uma aço do tipo Hadfield com alto teor de cromo após tratamento isotérmico a 850°C pelo tempo de 30 minutos. Nota-se a presença de grãos de austenita com precipitação de carbonetos em contornos de grãos na forma, praticamente, contínua. Ataque Nital 3%. Aumento 250x.

A temperatura de 850°C apresentou uma precipitação de carbonetos em contornos de grãos com morfologia muito semelhante ao encontrado em componentes que sofreram re-precipitação de carbonetos em contornos de grãos durante resfriamento, porém apresentou uma cinética muito mais lenta comparada com a temperatura de 750°C.