

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS
E MICROESTRUTURAIS DOS AÇOS AISI H13 STANDARD,
AIS1 H13 ESR E JIS SKD 61

Giliarde Alves

Passo Fundo

2021



Giliarde Alves

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DOS AÇOS AISI H13 STANDARD, AISI H13
ESR E JIS SKD 61**

Orientador: Prof. Dr. William Haupt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2021

CIP – Catalogação na Publicação

A474a Alves, Giliarde
Análise comparativa de propriedades mecânicas e
microestruturais dos aços AISI H13 standard, AISI H13 ESR e
JIS SKD 61 [recurso eletrônico] / Giliarde Alves. – 2021.
5,014 Kb ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. William Haupt.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Aço para ferramentas. 2. Metais - Propriedades
mecânicas. 3. Processos de fabricação. I. Haupt, William,
orientador. II. Título.

CDU: 621.9

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Giliarde Alves

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DOS AÇOS AISI H13 STANDARD, AISI H13
ESR E JIS SKD 61**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 30 de setembro de 2021.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor William Haupt
Orientador

Professor Doutor Afonso Reguly
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais PPGE3M
(UFRGS)

Doutora Sabrina Bodziak
IDEA Soluções em Impressão 3D - Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais (UDESC)

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Programa de Pós Graduação em Projetos e Processos de Fabricação PPGPPF (UPF)

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve ao meu lado durante os árduos dias de estudo e trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Claudino José Isidolino Alves e Isolde Alves, minha esposa Liliam Aparecida Venturi e aos meus filhos Enzo Alves Venturi e Clara Alves Venturi, que foram compreensivos quanto a minha ausência nos momentos em que estive envolvido com trabalhos acadêmicos.

A toda equipe da empresa JPR Dispositivos em especial senhor Altamir e Maicon Crescêncio que proporcionou a oportunidade de realizar a usinagem dos materiais em suas dependências, e o Me. Guilherme Eboni, Leandro Fortunato Gomes e Marcell Talita Pereira que auxiliaram desde o início com o conhecimento e auxílio na execução do trabalho e desprenderam todo conhecimento para a execução do estudo.

A todos os professores que ministraram as aulas para turma do mestrado e que nos passaram o conhecimento para nossa formação em especial ao Professor Orientador William Haupt pela orientação, paciência e sabedoria no desenvolvimento desse projeto.

Não posso deixar de citar e agradecer a todos que realizaram Mestrado comigo durante estes anos por compartilhar conhecimento durante o decorrer do curso.

À Universidade de Passo Fundo (UPF) em especial ao programa de Pós-Graduação em Projetos e Processos de Fabricação, que possibilitou a realização deste trabalho de pesquisa e à toda equipe técnica do Núcleo de Tecnologia Mecânica que disponibilizaram equipamentos para realização dos experimentos.

Enfim, agradeço a Deus pelo dom da vida, sem a qual eu nada poderia fazer.

*“Estude, enquanto eles dormem,
Trabalhe enquanto eles se divertem,
Lute, enquanto eles descansam, depois
Viva o que eles sempre sonharam”*

WILL SMITH

RESUMO

Os aços ferramenta JIS SKD 61, AISI H13 Standard e AISI H13 ESR são altamente utilizados para fabricação de moldes para injeção de alumínio e matrizes para forjamento a quente. Nesse processo de fabricação é fundamental que o aço ferramenta possua elevadas propriedades de resistência mecânicas em altas temperaturas a fim de se evitar falhas por fadiga térmica, propagação de trincas, deformação plástica e desgaste que são influenciados pelos tratamentos térmicos. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a caracterização dos aços JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard, através de análise química, microestrutural, dureza, resistência ao impacto e desgaste. O estudo visa verificar as propriedades do aço JIS SKD 61, produzido no Japão, atendendo a NADCA #207-2018 “Grade A/H13 Premium” em comparação aos aços AISI H13 Standard atendendo a NADCA #207-2018 “Grade A/H13 Premium” e AISI H13 ESR, produzido no Brasil, atendendo a NADCA #207-2018 “Grade B/H13 Superior”, verificando as suas particularidades antes e após o processo de tratamento térmico. As avaliações realizadas no MEV demonstraram que as fraturas se apresentaram predominantemente frágil, típica desta classe de materiais temperados e revenidos e também presença predominante de clivagem, com discreta presença de dimples. O ensaio de dureza demonstrou que os aços tiveram pequena diferença após o processo de tratamento térmico, sendo que, apenas os aços JIS SKD 61 e AISI H13 ESR ficaram na mesma faixa de dureza, podendo assim, serem comparados com maior assertividade. Nos ensaios de resistência ao impacto Charpy, o material AISI H13 Standard apresentou maior resistência ao impacto, devido a menor dureza do material, porém, o aço JIS SKD 61 apresentou maior resistência ao impacto, devido ao processo de fabricação deste aço que possui um processo de fabricação exclusivo da usina japonesa no qual consiste em ajuste da composição química, processo de refino para controle de impurezas e inclusões, homogeneização e alto grau de forjamento (redução 6:1). No ensaio de desgaste o material JIS SKD 61 apresentou-se melhor em comparação aos demais, tendo garantido menor perda de massa. Deste modo chegou-se aos resultados das análises comparativas de propriedades mecânicas e microestruturais dos aços AISI H13 Standard, AISI H13 ESR e JIS SKD 61.

Palavras-chave: Aço ferramenta JIS SKD 61. Aço ferramenta AISI H13. Aços para trabalho a quente. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

JIS SKD 61, AISI H13 Standard and AISI H13 ESR tool steels are widely used for manufacturing aluminum injection molds and hot forging dies. In this manufacturing process, it is essential that tool steel has high mechanical resistance properties at high temperatures in order to avoid failures due to thermal fatigue, crack propagation, plastic deformation and wear that are influenced by heat treatments. The present work aims to evaluate the characterization of JIS SKD 61, AISI H13 ESR and AISI H13 Standard steels, through chemical, microstructural, hardness, impact and wear resistance analysis. The study aims to verify the properties of JIS SKD 61 steel, produced in Japan, meeting NADCA #207-2018 "Grade A/H13 Premium" compared to AISI H13 Standard steel meeting NADCA #207-2018 "Grade A/H13 Premium" and AISI H13 ESR, produced in Brazil, in compliance with NADCA #207-2018 "Grade B/H13 Superior", verifying its particularities before and after the heat treatment process. The evaluations carried out at the SEM showed that the fractures were predominantly fragile, typical of this class of tempered and tempered materials, and also the predominant presence of cleavage, with a slight presence of dimples. The hardness test showed that the steels had little difference after the heat treatment process, and only the JIS SKD 61 and AISI H13 ESR steels were in the same hardness range, thus being able to be compared with greater assertiveness. In Charpy impact resistance tests, the AISI H13 Standard material showed greater impact resistance, due to the lower hardness of the material, however, the JIS SKD 61 steel showed greater impact resistance, due to the manufacturing process of this steel which has a process exclusively manufactured by the Japanese plant, which consists of adjusting the chemical composition, refining process to control impurities and inclusions, homogenization and a high degree of forging (6:1 reduction). In the wear test, the JIS SKD 61 material was better compared to the others, ensuring less mass loss. Thus, the results of comparative analyzes of mechanical and microstructural properties of AISI H13 Standard, AISI H13 ESR and JIS SKD 61 steels were arrived at.

Keywords: JIS SKD 61 tool steel. AISI H13 tool steel. Hot work steels. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama esquemático do processo de fabricação ESR	18
Figura 2: Tipos de fraturas.....	20
Figura 3: Forma dos dimples em função do modo de carregamento	22
Figura 4: Superfície de ruptura com “dimples” cônicos equiaxiais (a) e “Dimples” rasos (b)..	22
Figura 5: Micromecanismo de clivagem visualizado em aço liga.....	23
Figura 6: Representação esquemática do espectrômetro de emissão óptica	26
Figura 7: Esquema do aparato de testes ASTM G65-04	28
Figura 8: Exemplo corpos de prova para ensaio charpy.....	29
Figura 9: Fluxograma do processo	32
Figura 10: Sentido de corte longitudinal e transversal a laminação	35
Figura 11: Amostras antes e após processo de tratamento térmico.....	36
Figura 12: Tempo x Temperatura processo de tratamento térmico.....	38
Figura 13: Peças retificadas com dimensões (10mm x 55mm x comprimento a ser cortado) .	39
Figura 14: Esquema do aparato de testes ASTM G65-04, Aparato de testes.....	42
Figura 15: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “recozido” (200X e 500X).....	55
Figura 16: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “recozido” (1000X).....	56
Figura 17: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (200X e 500X).....	58
Figura 18: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (1000X)	59
Figura 19: MEV material JIS SKD 61, longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X).....	61
Figura 20: MEV material AISI H13 ESR longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X).....	62
Figura 21: MEV material AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X)	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Composição química de elementos críticos de liga e impurezas.....	33
Tabela 02: Composição química de elementos de liga e impurezas JIS SKD 61	33
Tabela 03: Composição química de elementos de liga e impurezas AISI H13 Standard	34
Tabela 04: Composição química de elementos de liga e impurezas AISI H13 ESR	34
Tabela 05: Dureza materiais.....	34
Tabela 06: Parâmetros de Teste (Conforme Norma ASTM G-65)	43
Tabela 07: Composição química aços AISI H13 Standard, AISI H13 ESR e JIS SKD 61.....	44
Tabela 08: Teste de Tukey nível de significância ($\alpha=0,05$) para comparar dureza nos 03 materiais.....	47
Tabela 09: Energia Absorvida Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação	48
Tabela 10: Energia Absorvida Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal a laminação)	49
Tabela 11: Teste de Tukey ao nível de significância ($\alpha=0,05$) para comparar a Energia Absorvida nos diferentes materiais	53
Tabela 12: Resultados Ensaio de Abrasão ASTM G-65	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Dureza aços JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard sentido de corte	45
Gráfico 02: Dureza aços JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard	45
Gráfico 03: Média e intervalos de confiança de dureza dos materiais	46
Gráfico 04: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação)	48
Gráfico 05: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal a laminação)	50
Gráfico 06: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal)	51
Gráfico 07: Comparativo de Energia Absorvida no teste de impacto nos 03 materiais	52
Gráfico 08: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR longitudinal x transversal)	54
Gráfico 09: Ensaio de desgaste por abrasão dos materiais (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard)	65
Gráfico 10: Ensaio de desgaste por abrasão dos materiais (JIS SKD 61, AISI H13 ESR)	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
ASTM	American Society for Testing and Materials
JIS SKD 61	Aço Ferramenta
DRX	Difratometria de raios X
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
ESR	Electroslag Remelting (Refusão eletroescória)
H 13	Aço Ferramenta
HRC	Durezas Rockwell C
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NADCA	North American Die Cast Association
TC	Temperatura crítica
TS	Temperatura da superfície
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
VD	Desgaseificação a vácuo

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE GRÁFICOS	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
SUMÁRIO.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 AÇOS FERRAMENTA	15
2.1.1 Aplicações/Tipos e Características dos Aços Ferramenta	15
2.2 AÇOS-FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE.....	16
2.2.1 Processo de Fabricação do Aço Ferramenta.....	17
2.2.2 Aplicações do Aço Ferramenta.....	18
2.3 TENACIDADE E TRATAMENTO TÉRMICO	18
2.3.1 Tratamentos Térmicos do Aço Ferramenta.....	19
2.4 TIPOS DE FRATURAS DÚCTEIS E FRÁGEIS.....	20
2.4.1 Definição e Fundamentos da Fratura	20
2.4.2 Fratura Dúctil	21
2.4.3 Fratura Frágil	23
2.5 RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM AÇOS FERRAMENTA.....	24
2.5.1 Desgaste Abrasivo.....	25
2.6 ANÁLISE QUÍMICA.....	26
2.7 ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO	27
2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	28
2.9 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	29
2.10 TIPOS DE FALHAS E FADIGA TÉRMICA.....	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 DEFINIÇÃO DAS ATIVIDADES	32
3.2 MATERIAIS (AÇOS UTILIZADOS)	33

3.3 DUREZA DOS MATERIAIS ANTES DO PROCESSO TRATAMENTO TÉRMICO...	34
3.4 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA TESTES E ENSAIOS.....	35
3.4.1 Amostras dos Materiais (JIS SKD 61, AISI H13 Standard E AISI H13 ESR).....	35
3.4.2 Requisitos do Tratamento Térmico	36
3.4.3 Preparação Corpos de Prova após Tratamento Térmico	38
3.4.4 Resistência ao impacto (Ensaio Charpy)	40
3.4.5 Composição Química por Espectrometria de Emissão Ótica.....	41
3.4.6 Microdureza	41
3.4.7 Metalografia	41
3.4.8 Ensaio de desgaste por abrasão.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 COMPARAÇÕES DAS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS MATERIAIS	44
4.2 DUREZA MATERIAIS	44
4.3 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	47
4.3.1 Ensaio de Impacto Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação).....	47
4.3.2 Ensaio de Impacto Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal).....	49
4.3.3 Comparação Ensaio de Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal a laminação)	50
4.4 MICROGRAFIA	54
4.5 MEV	60
4.6 ENSAIO DE DESGASTES	64
CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS	69
ANEXO A.....	73
ANEXO B.....	74
ANEXO C.....	75
ANEXO D.....	76
ANEXO E	77
ANEXO F	78
ANEXO G.....	79

1 INTRODUÇÃO

O crescimento e desenvolvimento global das organizações acarretam muitas vantagens emergentes, diante este cenário os materiais e processos disputam um mercado com cada vez melhores produtos e qualidade que conseqüentemente auxiliam no desempenho e custo nos processos produtivo.

O aumento da competitividade no mercado siderúrgico tem levado as empresas a uma busca constante pela melhoria da qualidade de seus produtos. Diante deste cenário, a melhoria contínua nos processos de fabricação dos aços vem crescendo. (MURTA, 2013)

Empresas da área automobilística utilizam matrizes para a fundição de ligas de alumínio, devido essa grande necessidade existem diversos fabricantes de materiais para atender essa demanda, com materiais que apresentam propriedades mecânicas específicas para essa aplicação.

Os materiais que passam pelo processo de fabricação ESR (Electro Slag Remelting), normalmente são os mais utilizados pelas empresas para fabricação de matrizes, justo que, os mesmos já possuem estudos/resultados satisfatório para esta aplicação. O processo de refusão por escória eletrocondutora-ESR tem como objetivo obter produtos de alta qualidade sob o ponto de vista de composição química, nível de inclusões, macros segregação e de estrutura bruta de solidificação. (GABARDO, 2008)

Um dos aços em estudo é o JIS SKD 61, o qual, não é fabricado pelo processo ESR, sendo assim, as empresas o caracterizam como sendo de uma classe inferior a este, enquadrando-o na Grade A/H13 Premium.

Os outros 02 aços utilizados foram o AISI H13 ESR que passa pelo processo de refundição ESR e AISI H13 Standard o qual não passa pelo processo de refundição.

Desgaste pode ser definido como: “o dano em uma superfície sólida envolvendo perda progressiva de massa, devido ao contato e ao movimento relativo entre a superfície e outro material” (COZZA 2006 *apud* OLIVEIRA, 2015).

O desgaste de ferramentas e componentes influenciam diretamente a produtividade e a eficiência dos equipamentos e processos de manufatura, desta forma a tendência do mercado é o aumento na produtividade e vida útil, utilizando processos mais confiáveis que garantam a qualidade do produto final. Assim a redução dos efeitos associados aos mecanismos de desgaste ou fratura torna-se fator primordial para o aumento da competitividade das indústrias.

O objetivo do trabalho é analisar comparativamente as propriedades mecânicas, microestruturais e o desempenho ao desgaste de 03 materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Realizar análises metalográfica/microestrutural em microscópio óptico e análise fractografica em MEV para caracterização das fases do material e modo de fratura;
- Realizar ensaios de resistência ao impacto Charpy para caracterização do modo de falha dos materiais;
- Realizar ensaio de dureza para avaliação da uniformidade de dureza nas fases dos materiais;
- Realizar ensaio de desgaste para avaliar o desempenho dos diferentes materiais conforme norma ASTM G 65.

Este estudo será realizado através de ensaios e testes atendendo todos os requisitos da NADCA 207#2018.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este trabalho será desenvolvido a partir do embasamento teórico, sendo que, os estudos a partir da literatura estão direcionados para a caracterização, composição dos aços, aplicações, tratamentos térmicos, ensaios e testes.

2.1 AÇOS FERRAMENTA

Na indústria siderúrgica a fabricação de aços especiais é um importante segmento, representado pelos aços ferramentas. Existe uma grande diversidade, contendo mais de 100 tipos de aços ferramentas, produzidos com a função de compor as mais diversas utilizações e suprimindo as demandas. A indústria de ferramentaria utiliza uma quantidade reduzida de tipos de aços, são normalizados internacionalmente, os quais apresentam características e desempenho reconhecido ao longo do tempo, como por exemplo, AISI H13, AISI D2 e AISI M2 (GABARDO, 2008).

Os aços ferramentas compreendem um conjunto de aços utilizados na fabricação de ferramentas de uso industrial, sejam elas manuais ou mecânicas. São normalmente de alta qualidade (isto é, com baixo nível de inclusões ou segregações), produzido sob severas tolerâncias de composição química e propriedades físicas). Os primeiros aços ferramentas foram os aços comuns ao carbono, sem elementos de liga e classificados como os aços W sendo que, a partir de 1968, muitos aços complexos, altamente ligados, foram desenvolvidos visando atender às crescentes exigências de severidade em serviço, obter controle dimensional e isenção de trincas durante o tratamento térmico. (GOBBI, 2009)

2.1.1 Aplicações/Tipos e Características dos Aços Ferramenta

A produção desses aços, destina-se a atingir um elevado padrão e envolve qualificação em aplicações nas operações que modificam o formato do material, tais como: corte, afiação, forjamento (GABARDO, 2008).

São reconhecidos esses aços por apresentarem elevadas dureza e resistência à abrasão, normalmente associado à manutenção das propriedades de resistência mecânica e boa tenacidade, em temperaturas elevadas. Normalmente, essas características permanecem com adição de altos teores de carbono e ligas como W, Mo, V, Mn e Cr (GABARDO, 2008).

A classificação dos aços ferramenta é dada de acordo com suas características metalúrgicas principais ou conforme sua finalidade, a mais usual dos aços ferramenta é a AISI (American Iron and Steel Institute), a qual tem se mostrado útil para a seleção de aços ferramenta. (SILVA *et al.*, 2006)

Aços da família AISI: SILVA *et al.*, 2006 *apud* Gabardo, 2008

- Série W – Aços temperáveis em água:
- Série S – Aços resistentes ao choque mecânico:
- Série L – Tipos baixa liga (Low alloy):
- Série P – Aços para moldes:
- Série O – Aços para trabalho a frio temperáveis em óleo:
- Série A – Aços para trabalho a frio temperáveis ao ar:
- Série D – Aços para trabalho a frio alto cromo e alto carbono:
- Série H – Aços para trabalho a quente (hot working):
- Série T – Aços rápidos ao tungstênio.
- Série M – Aços rápidos ao molibdênio:

2.2 AÇOS-FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE

Conforme (Vales, 2010), os aços ferramenta para trabalho a quente são aplicados para o processamento a quente de aços, ferros fundidos e ligas não ferrosas em geral, sendo que, são muito utilizados para a fabricação de matrizes para fundição sob pressão, moldes, extrusão a quente, e forjamento a quente. Estes aços possuem uma boa resistência ao amolecimento pelo calor devido ao seu médio teor de cromo e a adição de elementos de liga como molibdênio, tungstênio e vanádio que são tomadores de carbonetos de maior dureza e estabilidade térmica.

Esses aços integram um grupo especial de aços de alta liga, que são designados a fabricação de metais em altas temperaturas. O aço da família H mais utilizado é o AISI H13, que está na faixa de dureza entre 44 – 50 HRC, que é especificado para aplicações de ferramentas.

As principais características apresentadas pelo aço AISI H13 em função da sua composição química são: boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade, elevada resistência ao amolecimento pelo calor, elevada temperabilidade, boa usinabilidade entre os aços-ferramenta, excelente resistência a choques térmicos devidos aos

aquecimentos e resfriamentos contínuos, fazendo com que o surgimento de trincas térmicas seja reduzido. (UDDEHOLM; STEEL A HANDBOOK FOR MATERIALS, 1993). A definição do tratamento térmico com vistas nas propriedades finais do aço, não dependem somente da dureza, mas da qualidade do material no estado de fornecimento. A NADCA “North American Die Cast Association” prevê a qualidade no que se refere ao material, como fornecido, quanto ao tratamento térmico.

2.2.1 Processo de Fabricação do Aço Ferramenta

O processo de fabricação do aço durante a conformação a quente deve garantir que durante a fabricação não gerem carbonetos primários.

Estes carbonetos primários promovem grandes concentrações de tensão, com grande diminuição da tenacidade do aço durante o período de trabalho da ferramenta.

Os carbonetos primários são responsáveis pela resistência ao desgaste. Durante o revenimento a matriz é endurecida pelo processo de endurecimento secundário, isto é, pela precipitação de carbonetos muito finos. (SERNA,2008)

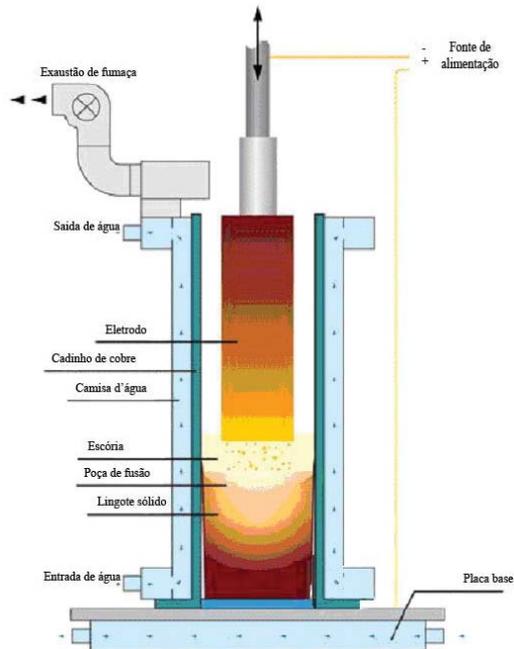
A fabricação do aço H13 é feito pelo processo ESR, que é fundido por meio de um processo VD (desgaseificação a vácuo) tradicional e utilizando uma lingoteira de cobre específica.

O processo ESR é um método de refusão secundário que usa escória sintética como origem de refino dos aços. Ocorre então a fusão do eletrodo que é mergulhado em um banho de escória sob um molde resfriado de água. Através da escória passa uma corrente elétrica, entre o eletrodo e o lingote sendo formado, superaquecendo a escória até que ocorra o gotejamento do metal fundido (eletrodo) (GABARDO, 2008).

As gotas da escória, atravessam o metal líquido refinando-o até o fundo do molde, onde se solidificam. Sua solidificação por fim é controlada e melhora a solidez e a integridade estrutural do material, resultando em um aço homogêneo e isotrópico. Esse processo de solidificação é mais rápido que em um processo tradicional. (LUCCHINI, 2005; CHOUDHURY, 1990).

A figura 1 ilustra o diagrama esquemático do processo de fabricação de aços por processo ESR.

Figura 1: Diagrama esquemático do processo de fabricação ESR



Fonte: Adaptado de Kelkar *et al.*, 2005

2.2.2 Aplicações do Aço Ferramenta

Essa espécie de aços-ferramentas é bastante utilizada na fabricação de matrizes de fundição sob pressão e extrusão de ligas não ferrosas, por exemplo alumínio, e ferramentas para forjamento a quente onde estão sujeitas à aplicação de solicitações térmicas e mecânicas num complicado arranjo de forças.

Em especial, as ferramentas para forjamento a quente, são feitos pelo material forjado onde estão envolvidos pressão, desgaste e impacto, associados à alta temperatura. Durante o processo produtivo, a matriz fica em contato com o blank aquecido (para o forjamento do aço chega a 1000 °C), onde sua superfície pode atingir temperaturas iguais ou maiores que a temperatura de seu revenimento. Logo, é primordial que a matriz tenha uma boa resistência mecânica a quente e resistência mecânica à perda de dureza sob altas temperaturas, ou seja, resistência ao revenimento. (ROBERTS *et al.*, 1988; SOUZA *et al.*, 1992)

2.3 TENACIDADE E TRATAMENTO TÉRMICO

Os aços ferramenta podem apresentar falta de tenacidade, que, poderá resultar em falhas resultando em trincas em locais de onde há concentração de tensão, trincas por fadiga

térmica ou trincas frágeis que podem acelerar o desgaste de uma ferramenta inviabilizando a sua utilização. É de extrema importância que os aços apresentem boa tenacidade na fabricação de moldes para fundição sob pressão, matrizes de forjamento e ferramentas para extrusão. (ROBERTS et al., 1980; MESQUITA *et al.*, 2007)

2.3.1 Tratamentos Térmicos do Aço Ferramenta

As circunstâncias de tratamento térmico dos aços ferramentas estão altamente ligadas às propriedades finais do material. Essas condições influem significativamente na microestrutura e nas propriedades dos aços ferramenta, tendo forte influência na vida útil do molde ou da matriz (GABARDO, 2008).

As propriedades mecânicas dos aços ferramenta, seu desempenho e vida útil, são funções da sua microestrutura, que depende de variáveis tais como elementos de liga presentes, suas concentrações e o tratamento térmico da liga (isto é, a temperatura, o tempo de aquecimento à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente) e o revenido posterior. (VALES, 2010).

Muitos fatores podem interferir nos resultados finais de uma têmpera, por isso, os parâmetros de tratamento devem ser bem definidos para que obtenham as propriedades requeridas. Para o tratamento térmico em aços ferramenta, normalmente são usados fornos a vácuo com resfriamento por gás em alta pressão, indicado para a obtenção da microestrutura que resultará nas propriedades mecânicas necessárias com mínimas distorções da ferramenta. (VALES, 2010).

Pode haver uma grande variação nas condições térmicas de material para material. Em termos tempo e valores de aquecimento, resfriamento e temperatura, deve-se respeitar as particularidades individuais de cada aço para que se consiga um desempenho satisfatório da ferramenta. O desempenho final da ferramenta dependerá muito das condições de temperatura, tempo, taxas de aquecimento e resfriamento bem como dos equipamentos utilizados (GABARDO, 2008).

Os tratamentos térmicos têm como objetivo causar uma alteração microestrutural de maneira controlada e com isso obter uma melhor combinação entre as diferentes propriedades dos aços com vista em sua aplicação. Nos aços ferramenta é de maior interesse obter uma estrutura de alta resistência mecânica e de resistência ao desgaste, parâmetros que estão

relacionados com a dureza que por sua vez são controlados através de tratamentos térmicos. (CARLIM; MARTINHUK,2015)

A têmpera a vácuo é uma técnica de tratamento térmico que vem se tornando cada vez mais popular, pois é uma tecnologia mais limpa se comparada ao tradicional resfriamento em óleos minerais. Durante o processo de têmpera a gás, qualquer parâmetro do processo pode ser determinante nos resultados finais, tais como distorções, dureza e tensões residuais (PENHA; VENDRAMIM; CANALE, 2011)

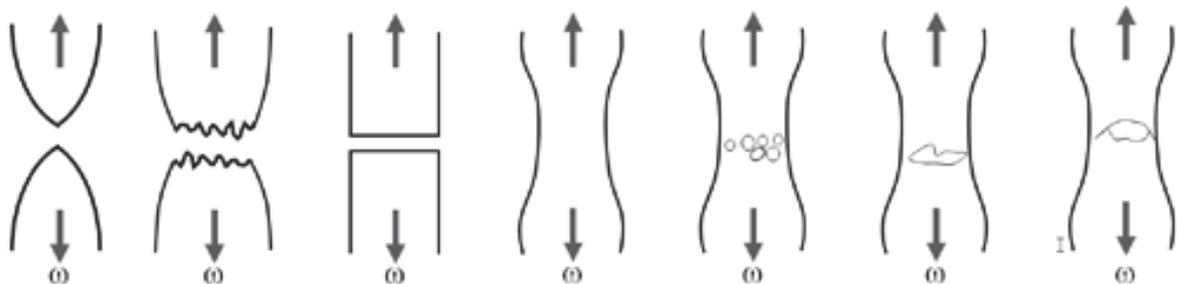
2.4 TIPOS DE FRATURAS DÚCTEIS E FRÁGEIS

2.4.1 Definição e Fundamentos da Fratura

De acordo com (Rocha *et al.* 2016), a fratura simples é a separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta à imposição de uma tensão de natureza estática em temperaturas que são baixas relativamente à temperatura de fusão. Existem dois modos de fratura: dúctil e frágil. A classificação é baseada na habilidade de um material apresentar deformação plástica. Os materiais dúcteis exibem tipicamente uma deformação plástica substancial com uma grande absorção de energia antes da fratura, cujo comportamento apresenta dependência com a temperatura.

A figura 2, demonstra os seguintes tipos de fratura: da esquerda para a direita: a) fratura altamente dúctil de estricção até um único ponto; b) Fratura moderadamente dúctil; c) Fratura frágil d) Empescoçamento inicial; e) Formação de cavidades pequenas; f) Coalescência de cavidades; g) Propagação da trinca

Figura 2: Tipos de fraturas



Fonte: Rocha *et al.* 2016

A mecânica da fratura surgiu com o intuito de suprir insuficiências deixadas pela mecânica clássica na abordagem da resistência dos materiais. Inicialmente os projetos estruturais eram baseados na mecânica clássica, especificamente na abordagem da resistência dos materiais, na qual a tensão aplicada ao componente mecânico era inferior a tensão limite de escoamento do material. Esta abordagem não considera a existência de descontinuidades/defeitos no interior do material, e por isso não evitava falhas repentinas e catastróficas em componentes estruturais. (ALVES, 2014)

De uma, forma geral, a fratura dos materiais metálicos é classificada em: fratura dúctil e fratura frágil. Pokluda e Sander'a (2012), baseia esta classificação em uma abordagem macroscópica, onde considera a existência ou ausência de deformação plástica nos componentes fraturados. (ALVES, 2014)

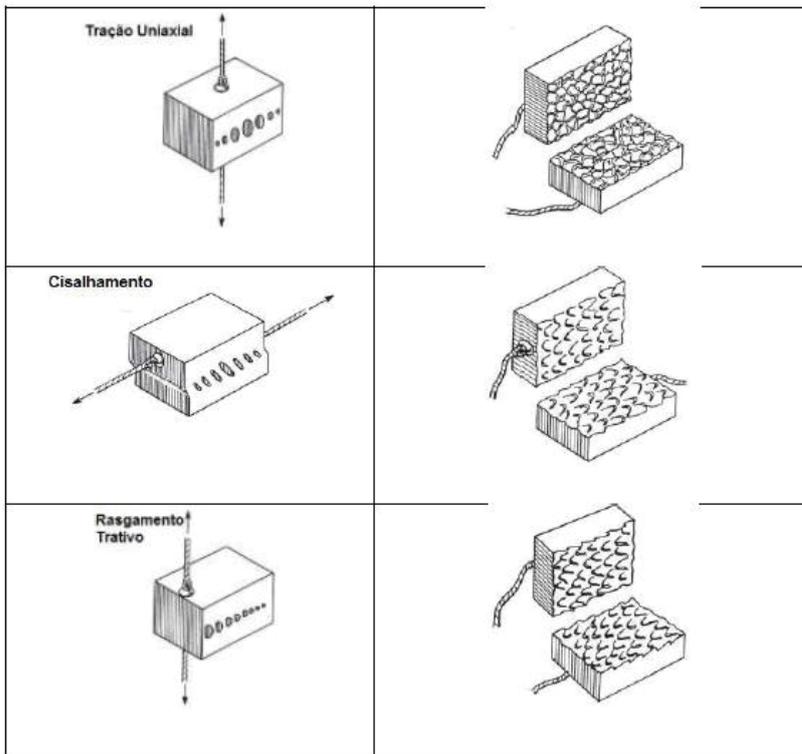
2.4.2 Fratura Dúctil

A fratura dúctil é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. (ROCHA *et al.* 2016)

A fratura dúctil está associada a significativa deformação plástica e é dependente do grau de restrição imposto ao componente estrutural. Em casos de pouca restrição, o componente será submetido a grandes níveis de deformação plástica, ou seja, em se tratando de carregamento trativo, o corpo de prova sofrerá grande redução de seção transversal. (JANSSEN; ZUIDERNA E WANHILL, 2006 *apud* ALVES, 2014)

Segundo (Janssen, Zuidema. e Wanhill, 2006 *apud* Alves,2014), Tawancy, Ul-hamid e Abbas (2004), conforme figura 3, o formato do dimple é governado pelo estado de tensão dentro do material no momento em que as micro cavidades se formam e coalescem. Estado uniaxial de tensões formam “dimples” essencialmente equiaxiais.

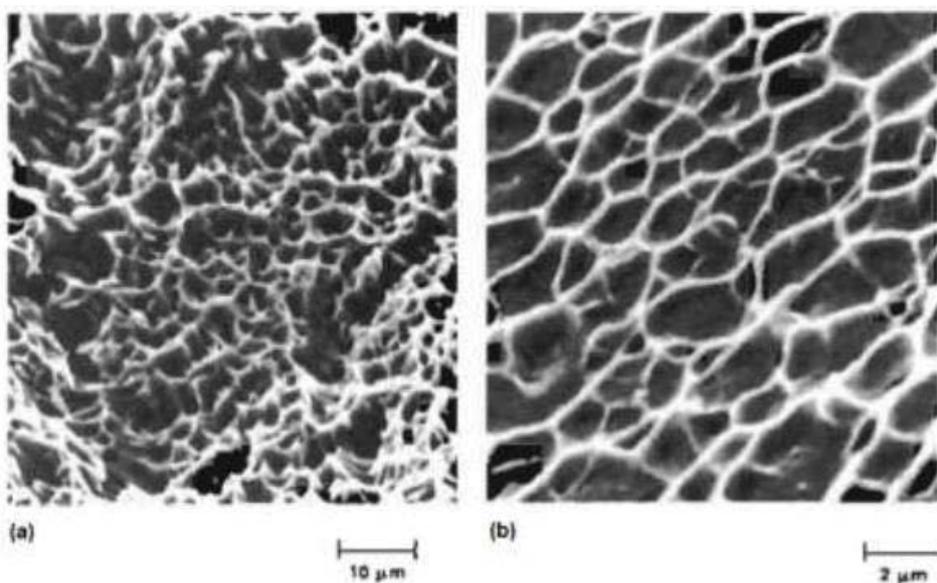
Figura 3: Forma dos dimples em função do modo de carregamento



Fonte: Janssen, Zuidema e Warrill, 2006 *apud* Alves, 2014

Dependendo da microestrutura e plasticidade do material, os “dimples” podem exibir uma forma cônica profunda ou pode ser raso, conforme figura 4.

Figura 4: Superfície de natureza com “dimples” cônicos equiaxiais (a) e “Dimples” rasos (b)



Fonte: Mills, 1987 *apud* Alves, 2014

2.4.3 Fratura Frágil

Na fratura frágil, as trincas podem se propagar de uma maneira extremamente rápida, acompanhadas de pouca deformação plástica. Tais trincas são denominadas instáveis e a propagação da trinca, uma vez iniciada, irá continuar espontaneamente sem aumento na magnitude da tensão aplicada. (Rocha *et al.* 2016),

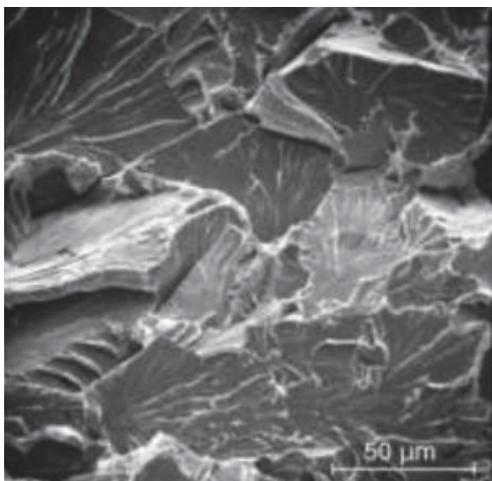
A fratura frágil ocorre sem deformação plástica apreciável e pela rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é aproximadamente perpendicular à direção da tensão aplicada e produz uma superfície de fratura relativamente plana. (Rocha *et al.* 2016).

Algumas superfícies de fratura frágil contêm linhas ou nervuras que se irradiam a partir do ponto de origem da trinca seguindo um padrão em forma de leque (Rocha *et al.* 2016)

A fratura frágil exibe pequena ou desprezível deformação plástica e está associada a uma baixa absorção de energia. A probabilidade do material fraturar de modo frágil aumenta com a redução da temperatura e/ou aumento da taxa de deformação aplicada durante o carregamento. (ALVES, 2014)

Em escala microscópica, a fratura frágil ocorre por uma rápida e gradual separação de átomos da estrutura cristalina, devido a ruptura das ligações atômicas, ao longo do plano de fratura de baixos índices cristalográficos. O micromecanismo que rege este processo é conhecido como clivagem e é caracterizado por superfícies planas, denominadas facetas de clivagem. A figura 5 exemplifica uma superfície de fratura obtida pelo micromecanismo de clivagem. (ALVES, 2014)

Figura 5: Micromecanismo de clivagem visualizado em aço liga



Fonte: Roesler, Harders e Baeker, 2007 *apud* Alves, 2014

Conforme Liu (2005) *apud* Alves, (2014) relata dois termos associados a clivagem: clivagem pura ou ideal e quase-clivagem. A clivagem pura, somente ocorre sob condições bem definidas associadas a microestrutura e condições de operação (Jha *et al.*, 2013). Quando é observado frações variadas de deformação plástica junto com facetas de clivagem se tem a quase-clivagem.

2.5 RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM AÇOS FERRAMENTA

Desgaste é o dano produzido em uma superfície, causado pela interação com outra superfície. Envolve a perda progressiva de material devido a carga e deslocamento entre as mesmas. O comportamento do material em situações de desgaste depende do tipo de contato, do nível de tensão, da temperatura resultante e da natureza do ambiente. Para mantê-lo dentro de limites aceitáveis faz-se geralmente uso de materiais mais resistentes e tratamentos de superfície. São identificados quatro tipos de desgaste): abrasivo, adesivo, corrosivo e desgaste por fadiga de contato. (GOOBBI, 2009)

O desgaste é uma característica ou fenômeno do sistema; não é uma propriedade do material. Diferentes materiais se desgastam de forma diferente na mesma situação. Portanto, é necessário examinar e caracterizar uma série de parâmetros diferentes, não apenas simplesmente a parte desgastada (ASM INTERNATIONAL, 1992).

He (2011) comenta que os principais mecanismos de falha em moldes de injeção envolvem os fenômenos de desgaste, deformação e fratura. Mais especificamente desgaste adesivo, abrasivo, por erosão e corrosão na superfície do molde, fadiga térmica e mecânica, choque térmico, deformação plástica e trincas grosseiras ASM International (1992). O desgaste afeta a vida útil de um molde em aproximadamente 70% em moldes de forjamento e 85% em ferramentas de estampo (SILVA *et al.*, 2011 *apud* Bodziak, 2017).

Durante o processo de moldagem, ferramentas e moldes são ciclicamente expostos a diferentes carregamentos mecânicos, térmicos, tribológicos e químicos, desta forma, conduzindo a uma remoção de material lenta e conseqüentemente afetando tolerâncias. Carregamentos mecânicos e tribológicos geralmente contribuem para a falha de moldes de trabalho a frio enquanto carregamentos térmicos e químicos são atribuídos à falha de moldes de trabalho a quente.

A indústria de moldes possui elevada exigência em relação às características dimensionais de peças injetadas (tolerância) e da superfície do molde (rugosidade, polibibilidade). A principal razão de falha por desgaste ocorre porque o material polimérico fundido flui sobre a superfície do molde, gerando grande atrito, degradando a superfície do molde e provocando um aumento na rugosidade (HE, 2011; VANCOLIIE et al., 2000 *apud* Bodziak, 2017).

2.5.1 Desgaste Abrasivo

Forma de contato que ocorre quando uma superfície com alta dureza e rugosidade ou uma superfície contendo partículas duras desliza sobre outra superfície mais macia, causando sobre esta uma série de sulcos. É resultante da penetração e formação de ranhuras com a retirada de material de uma superfície por outro corpo. Pode ocorrer com ou sem a presença de lubrificante. Um caso típico de desgaste abrasivo envolve uma superfície em contato com partículas sólidas com formas e propriedades mecânicas diversas. O que ocorre quando duas asperezas atuam é que em vez de deformar-se ou aderir, a mais dura corta ou risca a mais macia. Isso produz uma perda significativa de material na superfície mais macia. (OLIVEIRA, 2015)

A resistência ao desgaste abrasivo de aços carbono e aços baixa liga melhora com o aumento do conteúdo de carbono, independentemente da presença de outros elementos de liga. A microestrutura também é um fator importante. Uma estrutura perlítica apresenta melhor resistência do que uma estrutura esferoidizada. Em aços hipoeutetóides a resistência ao desgaste não só aumenta com um maior volume de perlita na estrutura mas também melhora com a diminuição do espaçamento lamelar. Em aços hipereutetóides a resistência ao desgaste continua a aumentar até que ocorra a formação de um filme contínuo de cementita em contornos de grão, que resulta em fragilização e arrancamento de material (fragilização intergranular). (GOOBBI, 2009)

Com aços ligados, os métodos de tratamento térmicos que alteram a matriz e a dispersão de carbonetos, tem uma influência fundamental na capacidade de resistir ao desgaste abrasivo. Segundo Hurrics *apud* Goobbi, 2009, a remoção de carbonetos primários e a precipitação de carbonetos secundários uniformemente distribuídos na matriz, proporciona uma melhora significativa na resistência ao desgaste. Assim, é indesejável uma distribuição

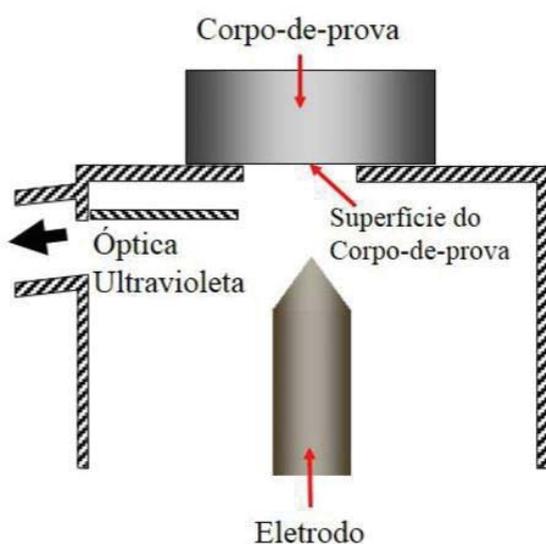
que deixa grandes áreas na matriz livres de carbonetos, como a que ocorre com a precipitação em contornos de grãos.

A presença de austenita retida na estrutura martensita-carbonetos parece ser benéfica e aumenta a resistência ao desgaste. Isto se deve ao fato da coesão carboneto-austenita ser melhor do que a adesão carboneto-martensita obtendo-se boa resistência a deformação plástica. Contudo, para um efeito positivo a quantidade de austenita deve ser pequena, pois esta fase possui baixa resistência ao desgaste. Portanto, a melhor resistência ao desgaste abrasivo em aços liga é obtida com uma estrutura martensítica com carbonetos finamente distribuídos e uma pequena quantidade de austenita residual. (GOOBBI, 2009)

2.6 ANÁLISE QUÍMICA

Segundo SILVA, *et al* (2017), para a determinação da composição química em materiais metálicos, um dos métodos utilizados é a espectroscopia de emissão óptica. O princípio de funcionamento desse método/equipamento é baseado na medição das três grandezas físicas básicas da luz ou da onda eletromagnética: intensidade (ou amplitude), frequência e polarização (ângulo de vibração) (ASTM A751 – 11; SERWAY; RAYMOND, 2011). No espectrômetro de emissão óptica essas grandezas físicas são visualizadas com a excitação do corpo-de-prova por meio de uma tensão elétrica.

Figura 6: Representação esquemática do espectrômetro de emissão óptica



Fonte: SILVA *et al* (2017)

Conforme figura 6, o eletrodo fornece uma tensão elétrica no corpo-de-prova para que seja possível visualizar as três grandezas físicas da luz emitida por cada elemento químico constituinte na liga, as quais são medidas pela óptica ultravioleta do equipamento. Desse modo, é possível identificar a intensidade luminosa de cada comprimento de onda que existe na composição do feixe incidente, permitindo assim, a caracterização e a quantificação em massa dos elementos químicos presentes na liga.

2.7 ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO

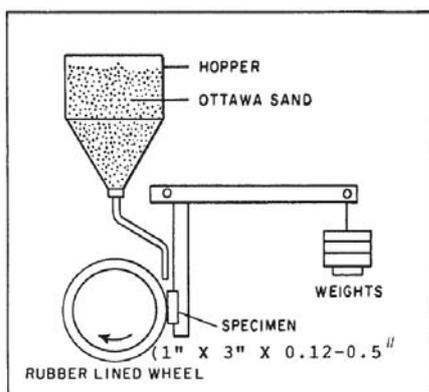
De acordo com DOERING. *et al* (2011) alegaram que o teste de resistência ao desgaste ASTM G65-04 é um dos mais comuns Ensaios à prova de abrasão.

Segundo a Norma ASTM G65-04, o ensaio de abrasão com areia seca borracha envolve abrasão de uma amostra de ensaio normalizada com um tamanho e composição controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e uma roda giratória com borracha de clorobutilo ou aro de uma dureza especificada. Nesse ensaio, o corpo de prova é pressionado contra a roda giratória e forçado por meio de um braço de alavanca enquanto um fluxo controlado de areia abrasiva é continuamente depositado na superfície de teste. A rotação da roda é tal que sua face de contato se move na direção do fluxo de areia. Nota-se que o eixo de articulação do braço de alavanca encontra-se dentro de um plano que é tangente à superfície da roda de borracha e ao diâmetro horizontal ao longo do qual a carga é aplicada.

Para Bayer 2004 *apud* Oliveira, 2015, o desgaste não se limita apenas a perda de materiais de uma superfície, pode ser definido também pelo movimento do material sem a perda de massa, ou seja, alterações na geometria ou dimensão como resultado de uma deformação plástica.

Os corpos de prova são pesados antes e após o teste e a perda de massa fica registrada. É necessário converter a perda de massa em perda de volume em milímetros cúbicos, devido às grandes diferenças na densidade de materiais. A abrasão é relatada como perda de volume por procedimento especificado, conforme figura 7.

Figura 7: Esquema do aparato de testes ASTM G65-04



Fonte: ASTM G65-04

A complexidade do desgaste pode ser melhor entendida conhecendo as variáveis envolvidas no processo, como: dureza, tenacidade, ductilidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, propriedades relativas à fadiga, estrutura e composição das superfícies em contato, geometria e pressão de contato, temperatura, coeficiente de atrito, acabamento superficial, lubrificantes e contaminantes (STOETERAU, 2004 *apud* OLIVEIRA, 2015).

O desgaste por abrasão é um fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a perda de massa das peças. De todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais encontrado na indústria em geral (EYRE, 1991 citado por VILLABÓN; SINATORA, 2006 *apud* OLIVEIRA, 2015).

Nos materiais ferrosos a relação entre a resistência ao desgaste e a dureza não é simples. O aumento no teor de carbono faz a resistência ao desgaste aumentar. A resistência ao desgaste geralmente aumenta conforme a microestrutura é mudada de ferrita para perlita, desta para bainita e finalmente para martensita, desde que seja acompanhada de aumento de dureza. Entretanto, para um mesmo valor de dureza, a estrutura bainítica tem maior resistência ao desgaste do que a martensítica. (OLIVEIRA, 2015).

2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Segundo Dedavid *et al* (2007), MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida.

Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia. O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI *et al. apud* FACCIO, 2016).

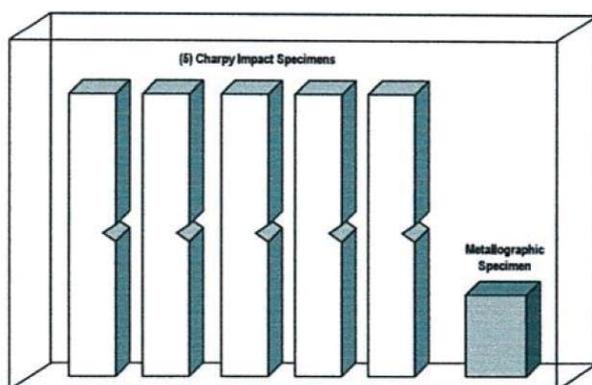
Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

2.9 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Um dos ensaios para a caracterização do comportamento dúctil-frágil dos materiais é feita a partir de ensaios mecânicos de impacto. Ensaios de impacto são dinâmicos, onde a carga é aplicada nos corpos de prova por meio do choque entre a amostra e da queda de um pêndulo. Os ensaios de impacto mais conhecidos são o Charpy e o Izod. (GARCIA *apud* Souza 2019).

Os corpos de prova para ensaio Charpy convencionais são padronizados pelas normas ASTM E23-18 e ISO 148-1 e possuem um formato de barra com seção transversal quadrada e um entalhe usinado, que concentra o local da fratura. (Souza, 2019).

Figura 8: Exemplo corpos de prova para ensaio charpy



Fonte: NADCA 207#2018

2.10 TIPOS DE FALHAS E FADIGA TÉRMICA

As falhas são eventos quase sempre indesejáveis, pois colocam em risco vidas humanas, acarretam perdas econômicas e indisponibilizam produtos e serviços.

Embora seja possível conhecer o comportamento do material e os motivos que geram a falha, é difícil se garantir a prevenção das mesmas. As causas podem ser seleção e processo de materiais de maneira incorreta, componente com projeto inadequado ou má utilização do componente (GABARDO, 2008).

A trinca tem como causa a fadiga acarretada por ciclos de aquecimento/resfriamento característicos dos processos de injeção de alumínio. (FAGUNDES *et al.*, 2005)

A fadiga térmica, devido à constante variação de temperatura superficial na matriz, pode resultar no aparecimento de um fino arranjo de trincas, que também pode impossibilitar o uso da matriz em certos casos. Este mecanismo de falha é encontrado, mais frequentemente, em matriz de fundição sob pressão, podendo também ocorrer em outras situações de conformação a quente. Nos casos de fadiga térmica, é fundamental que se utilize aço com maior tenacidade, a fim de se inibir a propagação de trincas e reduzir os danos causados (ROBERTS *et al.*, 1988). A uniformidade das propriedades do aço em todas as direções, ou seja, a isotropia é fundamental para moldes e matrizes devido à grande complexidade em torno de suas formas. As propriedades variam com a direção, principalmente devido às variações microestruturais ligadas à microsegregação que prejudicam as propriedades mecânicas da ferramenta, principalmente a tenacidade na direção transversal do material. Podem-se realizar tratamentos de homogeneização em altas temperaturas para reduzir os efeitos da microsegregação e, por consequência, aumento da isotropia. Maior tenacidade e alta isotropia também podem ser obtidas por processos de refusão como eletroescória (ESR) (ROBERTS *et al.*, 1988, CHOUDHURY, 1990; WAHLSTER, 1975).

Li *et al.*, 1998, estudaram a fadiga térmica do aço H13, utilizando equipamentos de simulação térmica. Partindo do aço H13 austenitizado a 1050 °C, observaram que o limite de fadiga térmica aumentou de 436 °C para 476 °C, quando se alterou a temperatura de revenimento de 560 °C para 600 °C. Além disso, verificou que o aço H13 apresenta maior resistência à fadiga térmica que o aço H21.

Starling *et al.*, 1997, avaliaram a influência de diferentes tipos de revestimentos duros sobre a fadiga térmica do aço H13. Partindo do aço H13 temperado e revenido com dureza 37

HRC, utilizaram revestimentos de Ti, Cr e revestimentos duplex sobre este aço, e executaram 500 ciclos de fadiga térmica com aquecimento indutivo, intercalado por resfriamento em ducha de água de forma controlada entre 750 °C e 50 °C. Constataram que os diferentes tipos de revestimentos duros podem inibir a fadiga térmica. Os melhores resultados foram obtidos com o Cr e Ti, enquanto o revestimento duplex não acarretou bons resultados.

Yoshida *et al.*, 2004, fazem uma série de recomendações para o tratamento térmico do aço H13. No tocante à fadiga térmica, recomendam o uso de revestimentos duros de nitretos nitretação. Entretanto, o tipo de nitretação pode afetar significativamente a fadiga térmica. Uma nitretação gasosa convencional tende a formar uma rede de nitretos via contorno de grão, o que é extremamente prejudicial. Melhores resultados são obtidos com o uso de nitretação por plasma, que elimina este inconveniente.

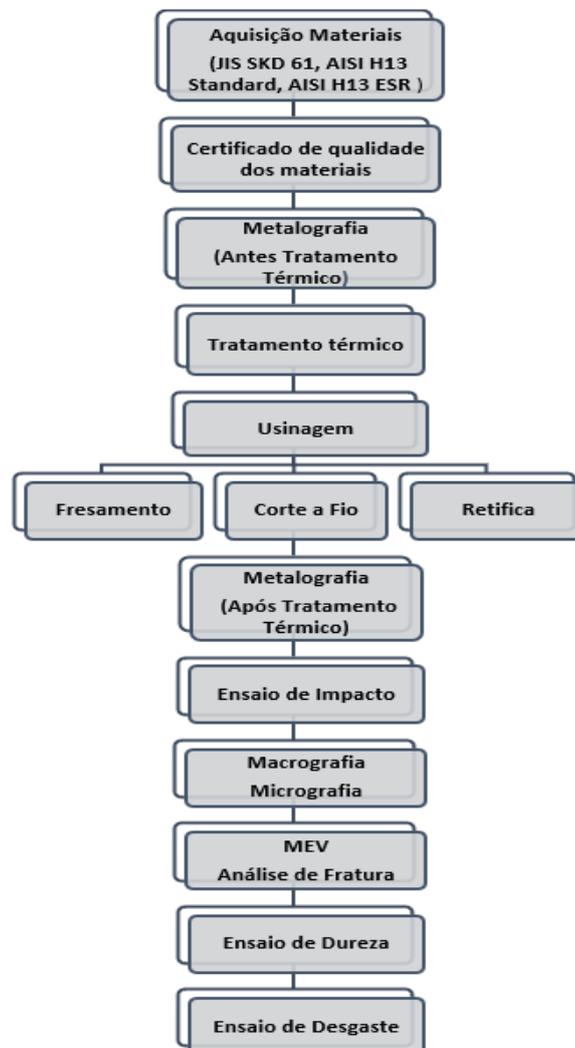
3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir da análise comparativa de 3 materiais, com os procedimentos e considerações para cumprimento dos requisitos da NADCA#207-2018.

3.1 DEFINIÇÃO DAS ATIVIDADES

A primeira parte da metodologia foi a definição das atividades a serem executadas nos laboratórios, tratamentos térmicos e medições. Na figura 9, tem-se o fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização deste estudo.

Figura 9: Fluxograma do processo



3.2 MATERIAIS (AÇOS UTILIZADOS)

Os aços estudados têm as designações AISI H13 Standard, AISI H13 ESR e JIS SKD 61 que necessita os requisitos de qualidade do material como composição química, elementos críticos de liga e impurezas os mesmos foram cortados com as dimensões de aproximadamente 2 ½" x 4 ½" x ½", sendo que, devem ser preparados a partir de uma amostra de preferência do mesmo bloco de aço da matriz com qualidade conhecida.

Os graus de qualidade do aço da matriz devem estar em conformidade com os requisitos químicos conforme Tabela 01, que atendem os quesitos da NADCA #207-2018.

Tabela 01: Composição química de elementos críticos de liga e impurezas

Grau NADCA	Categoria Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
A	Tipo H13- Premium	0,37- 0,42	0,20- 0,50	0,025 Máx.	0,005 Máx.	0,80- 1,20	5,00- 5,50	1,20- 1,75	0,80- 1,20
B	Tipo H13- Superior	0,37- 0,42	0,20- 0,50	0,015 Máx.	0,003 Máx.	0,80- 1,20	5,00- 5,50	1,20- 1,75	0,80- 1,00
C	Tipo 2367 & modificado	0,32- 0,40	0,10-1,2	0,020 Máx.	0,003 Máx.	0,10- 0,50	4,70- 5,85	2,00- 3,30	0,40- 0,70
D	Tipo H11/2343	0,35- 0,42	0,20- 0,60	0,025 Máx.	0,003 Máx.	0,80- 1,20	5,00- 5,50	1,10- 1,60	0,30- 0,60
E	Tipo H11 Modificado - Superior	0,32- 0,43	0,10- 0,70	0,020 Máx.	0,003 Máx.	0,10- 0,55	4,70- 5,70	1,10- 2,10	0,30- 0,80
F	Tipo H11 Modificado - Premium	0,32- 0,40	0,30- 0,90	0,020 Máx.	0,005 Máx.	0,25- 0,70	5,30- 5,70	1,00- 1,60	0,40- 0,80
G	Tipo 2367 modificado - reduzido Cr	0,32- 0,40	0,10- 0,60	0,020 Máx.	0,003 Máx.	0,10- 0,50	3,50- 4,00	2,00- 3,30	0,40- 0,70
H	Tipo 2367 modificado - baixo Mo	0,33- 0,38	0,20- 0,50	0,015 Máx.	0,003 Máx.	0,10- 0,40	4,50- 5,20	1,60- 2,00	0,70- 0,90

Fonte: Nadca #207-2018

A composição química do material JIS SKD 61 apresentado na Tabela 02 atende à Norma Nadca #207-2018 “Grade A/H13 Premium”. O Certificado de Qualidade emitido pelo fabricante encontra-se no Anexo E

Tabela 02: Composição química de elementos de liga e impurezas JIS SKD 61

Composição Química (% em peso)															
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Al	Ti	Cu	Nb	B	N	Out
0,380	0,970	0,400	0,009	0,001	5,100	0,000	1,240	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Fabricante, 2020

A composição química do material AISI H13 Standard apresentado na Tabela 03 atende à Norma Nadca #207-2018 “Grade A/H13 Premium”. O Certificado de Qualidade emitido pelo fabricante encontra-se no Anexo A e B.

Tabela 03: Composição química de elementos de liga e impurezas AISI H13 Standard

Composição Química (% em peso)													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	Nb	Al	B
0,40	0,84	0,37	0,020	<0,0010	5,26	1,26	0,19	0,83	0,05	0,07	<0,01	0,023	<0,0005
Pb	Sn	As	Bi	H	N								
<0,0025	<0,0050	<0,005	<0,005	<0,00010	0,0143								

Fonte: Fabricante, 2020

A composição química do material AISI H13 ESR apresentado na Tabela 04 atende à Norma Nadca #207-2018 “Grade B/H13 superior”. O Certificado de Qualidade emitido pelo fabricante encontra-se no Anexo C e D.

Tabela 04: Composição química de elementos de liga e impurezas AISI H13 ESR

Composição Química (% em peso)														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	B	Pb	Sn	As	Bi	Se
0,38	0,91	0,35	0,009	<0,001	5,11	1,20	0,82	<0,01	<0,0005	<0,0025	<0,0050	<0,005	<0,005	<0,005

Fonte: Fabricante, 2020

3.3 DUREZA DOS MATERIAIS ANTES DO PROCESSO TRATAMENTO TÉRMICO

O equipamento utilizado para o ensaio de microdureza foi um Microdurômetro Shimadzu Modelo HMV-G20ST. A dureza foi medida na escala Vickers (após convertida para Rockwell) ao longo do corpo de prova. Com uma carga de 0,25 kgf, com 05 medições e distância de 0,05mm nas 6 faces (frente, traz, direita, esquerda, superior e inferior) para atendimento da Nadca #207-2018. A Dureza dos materiais conforme Grade A e Grade B da NADCA, sendo a dureza máxima no estado recozido, não deve exceder 235 HBW.

A tabela 05 representa a dureza de cada material que consta nos certificados de qualidade dos fabricantes que estão nos anexos A, B, C, D e E.

Tabela 05: Dureza materiais

Material	Dureza HBW
JIS SKD 61 (Grade A/H13 Premium)	179
AISI H13 Standard (Grade A/H13 Premium)	204,2
AISI H13 ESR (Grade B/H13 Superior)	212,2

Fonte: O Autor, 2020

3.4 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA TESTES E ENSAIOS

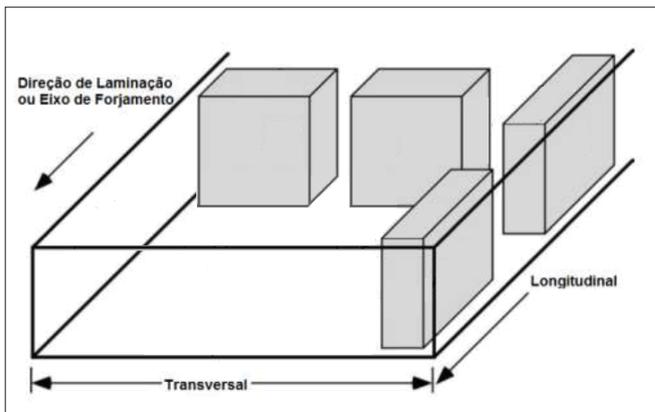
Os limites admissíveis de microlimpeza (níveis de severidade do conteúdo de inclusão não metálica) devem ser determinados pela ASTM E45.

Os testes serão realizados em todos os materiais atendendo todas as normas citadas na Nadca #207-2018.

3.4.1 Amostras dos Materiais (JIS SKD 61, AISI H13 Standard E AISI H13 ESR)

Cada material teve 08 amostras com dimensões de $2\frac{1}{2}$ " x $4\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{2}$ ", sendo 04 amostras cortadas no sentido “longitudinal a laminação” e 04 amostras cortadas no sentido “transversal a laminação”, sendo que, as mesmas devem ser preparadas a partir do mesmo bloco de aço da matriz, de modo que o lado de $2\frac{1}{2}$ " representa a direção da espessura, o lado $4\frac{1}{2}$ " representa a direção da largura e $\frac{1}{2}$ " representa a direção do comprimento do material original.

Figura 10: Sentido de corte longitudinal e transversal a laminação



Fonte: Autor, 2021

A figura 11, apresenta todas as amostras antes o processo de tratamento e após as amostras passarem pelo processo de tratamento térmico.

Figura 11: Amostras antes e após processo de tratamento térmico



Fonte: Autor, 2020

3.4.2 Requisitos do Tratamento Térmico

De acordo com a NADCA #207-2018 o processo de tratamento térmico deverá ser realizado em forno a vácuo.

Os parâmetros mais críticos no tratamento térmico de aços de matriz de qualidade especial são o tratamento de austenitização e a temperatura de austenitização. A taxa de têmpera deve ser rápida, mas controlada para fornecer propriedades metalúrgicas ideais enquanto minimiza a distorção e o risco de rachaduras.

3.4.2.1 Carregamento do forno, Austenitização e Têmpera

Partes da carga devem ser colocadas e distribuídas para permitir aquecimento e resfriamento uniformes, a geometria das peças deve ser considerada para garantir tratamento térmico uniforme e prevenção de trincas e o forno não deve ser sobrecarregado, para que a taxa de têmpera mínima possa ser alcançada.

Para a austenitização deverá ser aquecido rapidamente da temperatura final de pré-aquecimento, o tempo de imersão deve ser de 30 minutos após $T_s - T_c < -4^{\circ}\text{C}$ ou 90 minutos no máximo após T_s atingir a temperatura de austenitização designada, o que ocorrer primeiro.

Para a Tempera deve-se resfriar rapidamente a 150°C conforme medido pelo termopar de núcleo, T_c , a taxa de têmpera mínima deve ser $28^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ entre a temperatura de

austenitização designada e 540°C, medida por T_s ; isto é, T_s deve atingir 540°C em menos de 18 minutos, sendo que, esta definição de como medir a taxa de resfriamento é necessária para evitar discrepâncias.

A têmpera pode ser interrompida quando T_s está entre 455°C e 400°C, sendo que, uma têmpera interrompida é recomendada quando a diferença entre a superfície e o termopar do núcleo excede 90°C. É "interrompido, o resfriamento rápido com gás pressurizado deve ser retomado quando:

- 1) $T_c - T_s \leq 100^\circ\text{C}$; ou
- 2) T_s atinge 400°C; ou
- 3) O tempo total de interrupção atinge no máximo 30 minutos.
- 4) Retome a têmpera com gás pressurizado até $T_c < 150^\circ\text{C}$.

Manter a têmpera com gás pressurizado até $T_c < 150^\circ\text{C}$, as amostras devem ser resfriadas em ar parado até a temperatura da superfície $T_s \leq 50^\circ\text{C}$ antes do revenimento e deverá ser carregado imediatamente para a primeira têmpera.

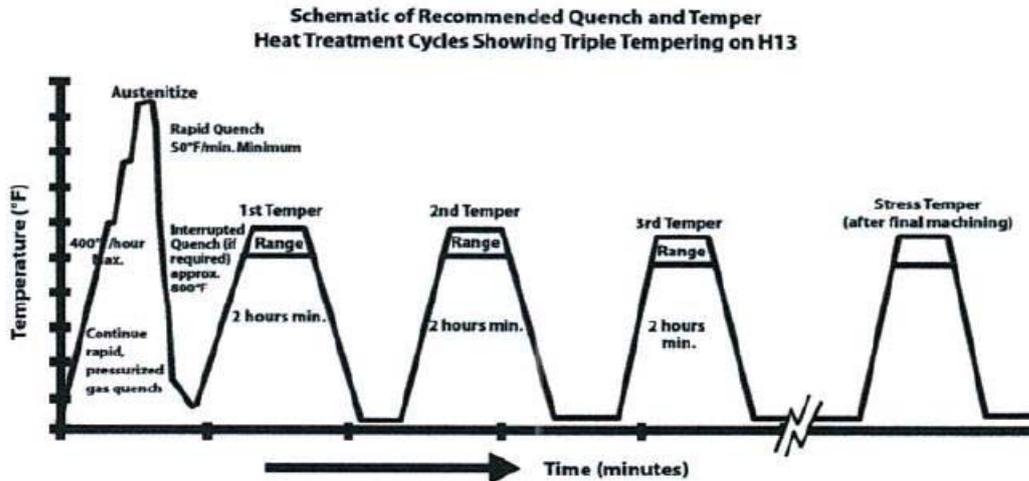
3.4.2.2 Têmpera e Endurecimento

Um mínimo de dois ciclos de revenimento são necessários antes das operações de acabamento, sendo que o primeiro e o segundo revenimentos devem estar a uma temperatura mínima de 565°C, após deverá ser resfriado à temperatura ambiente entre os ciclos de têmpera e o terceiro revenido das amostras, quando usado, deve estar a 550°C, no mínimo.

O revenimento pode ser executado em fornos de ar, vácuo ou atmosfera e os ciclos de revenimento devem ser mantidos por uma hora por polegada de espessura com base no termopar do forno, duas horas no mínimo.

Se o reabastecimento for necessário, a peça de trabalho deve ser recozida a uma temperatura de acordo com as recomendações do fornecedor de aço para 1 hora por polegada de espessura, seguido por resfriamento lento a uma taxa de menos de 33°C/h para 595°C, então o forno resfriado.

Figura 12: Tempo x Temperatura processo de tratamento térmico



Fonte: Nadca #207-2018

3.4.3 Preparação Corpos de Prova após Tratamento Térmico

De cada amostra endurecida deverá ser retirado cinco (5) corpos de prova para o teste de impacto Charpy de 10mm x 10mm devem ser usinados e entalhados de acordo com ASTM A370-05.

As etapas de preparação dos corpos de prova passaram por processo de fresamento, retifica, corte a fio e polimento.

3.4.3.1 Usinagem, Retifica e Corte a Fio

Após as amostras terem passados pelo processo de certificação conforme etapas anteriores e também pelo tratamento térmico os mesmos foram encaminhados para fresagem com as seguintes dimensões:

1ª Etapa de Fresagem

- Espessura da amostra 55mm +0, -2,5mm
- Largura da amostra 90mm
- Comprimento da amostra 10mm +/- 0,075mm
- Lados adjacentes 90° +/- 10min

O equipamento utilizado para desbastar as peças é uma fresadora Diplomat modelo FvF 3000, foi utilizado fluido de refrigeração para não impactar com o processo de tratamento térmico e pastilhas para aço ferramenta.

2ª Etapa de Retifica

- Espessura da amostra 55mm +0, -2,5mm e retificado com 4 μ m
- Largura da amostra 90mm retificado com 2 μ m
- Comprimento da amostra 10mm +/- 0,075mm e retificado com 2 μ m
- Lados adjacentes 90° +/- 10min

O equipamento utilizado para retificar as peças é uma retifica GER RSA 750, foi utilizado com fluido de refrigeração para não impactar com o processo de tratamento térmico.

A figura 13, representa as peças já retificadas com as medidas finais e atendendo as tolerâncias espessura da amostra 55mm, comprimento da amostra 10mm e a largura está aproximadamente 90mm a qual foi marcada para posterior corte a fio.

Figura 13: Peças retificadas com dimensões (10mm x 55mm x comprimento a ser cortado)



Fonte: O Autor, 2020

3ª Etapa Corte a Fio

- Largura da amostra 10mm corte a fio
- Lados adjacentes 90° +/- 10min

O equipamento utilizado para realizar o corte de cada bloco em 5 corpos de prova é um equipamento Eletroerosão a Fio modelo CUT 30P, foi utilizado fluido de refrigeração para não impactar com o processo de tratamento térmico com eletrodo e acabamento.

4ª Etapa de Fresagem

- Largura da amostra 10mm +0, -2,5mm
- Lados adjacentes 90° +/- 10min
- Retirar parte do entalhe sobra do corte a fio lado oposto entalhe
- Centralização do entalhe +/- 1mm
- Ângulo de entalhe +/- 1°
- Raio de entalhe +/- 0,025mm
- Profundidade do entalhe +/- 0,025mm

O equipamento utilizado para desbastar as peças é uma fresadora Diplomate FvF 3000, foi utilizado com fluido de refrigeração para não impactar com o processo de tratamento térmico e pastilhas para aço ferramenta.

5ª Etapa de Retifica

- Largura da amostra (lado entalhe e oposto) 10mm +0, -2,5mm retificado com 2µm

O equipamento utilizado para retificar as peças é uma retifica GER RSA 750, foi utilizado com fluido de refrigeração para não impactar com o processo de tratamento térmico.

3.4.4 Resistência ao impacto (Ensaio Charpy)

As amostras temperadas e já preparadas, cinco (5) corpos de prova de impacto Charpy de 10mm x 10mm x 55mm e entalhados de acordo com ASTM A370-05, sendo que os entalhes de EDM (usinagem por descargas elétricas) não são permitidos.

As amostras devem ser marcadas de forma a manter a orientação adequada das amostras Charpy para garantir que a face adequada seja entalhada.

O teste deve ser conduzido em temperatura ambiente em máquinas de teste que atendam aos requisitos de calibração da ASTM E23 ou ISO 148/R442.

Os dados de impacto devem ser lidos e registrados após o arredondamento para o número inteiro mais próximo de acordo com o parágrafo ASTM A370-05. Uma vez excluídos os valores mais altos, o resultado consiste na média aritmética de três valores de energia.

Os ensaios de impacto foram executados em um equipamento da marca HECKERT, com capacidade de 300 J. A medição da energia absorvida é analógica, com resolução de 1 J.

Para atendimento da Nadca #207-2018, foram retirados o maior e menor valor de energia absorvida de cada bloco de amostras, passando de 20 resultados obtidos para 12 resultados de cada material;

3.4.5 Composição Química por Espectrometria de Emissão Ótica

O ensaio de composição química dos materiais que fornece os percentuais de cada material que o compõe, foram obtidas através de verificação por espectrômetro de massas modelo FOUNDRY-MASTER Xline Potência 600 VA.

3.4.6 Microdureza

O equipamento utilizado para o ensaio de microdureza foi um Microdurômetro Shimadzu Modelo HMV-G20ST. A microdureza foi medida na escala Vickers ao longo do corpo de prova. Com uma carga de 0,25 kgf, com 05 medições e distância de 0,03 mm em 6 faces para comparação da microdureza nestas fases.

3.4.7 Metalografia

Os ensaios metalográficos seguiram os procedimentos de preparação e análise da norma ASTM E-03.

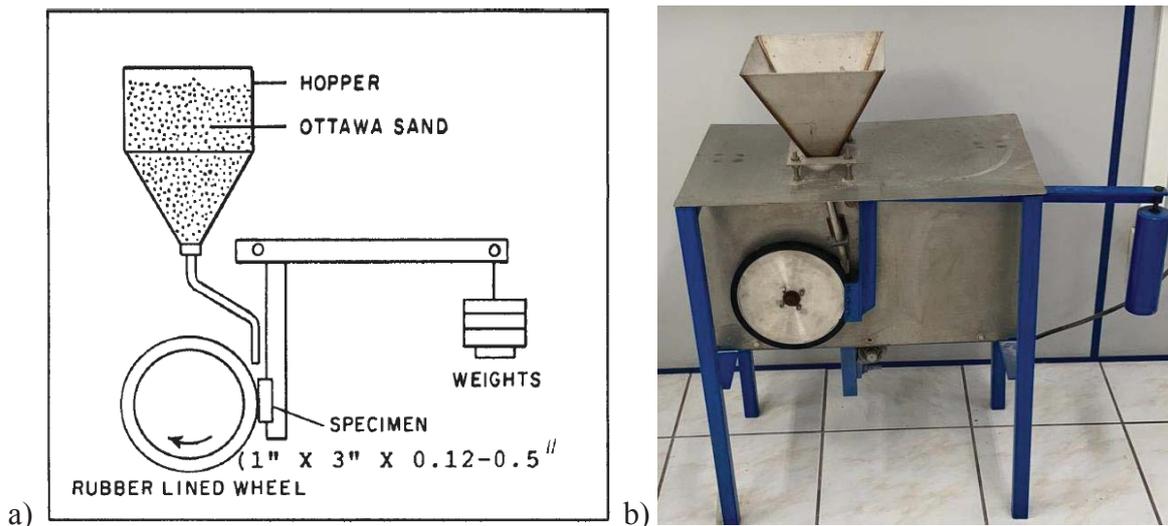
Foram realizadas análises metalográfica nos materiais JIS SKD 61, AISI H13 Standard, AISI H13 ESR “longitudinal e transversal a laminação” na forma recozida e após tratamento térmico, os materiais foram atacados quimicamente, após, foram realizadas análises em microscópio óptico “Microscópio Zeiss” com ampliação de 200, 500 e 1000X.

Foi realizada análise com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Tescan, com ampliação de 40, 150 e 5000X e realizado a análise fractográfica em MEV para estudo do modo de fratura em cada material.

3.4.8 Ensaio de desgaste por abrasão

Nesse ensaio, o corpo de prova é pressionado contra a roda giratória e forçado por meio de um braço de alavanca enquanto um fluxo controlado de areia abrasiva é continuamente depositado na superfície de teste. A rotação da roda é tal que sua face de contato se move na direção do fluxo de areia. Nota-se que o eixo de articulação do braço de alavanca encontra-se dentro de um plano que é tangente à superfície da roda de borracha e ao diâmetro horizontal ao longo do qual a carga é aplicada. Os corpos de prova são pesados antes e após o teste e a perda de massa fica registrada. É necessário converter a perda de massa em perda de volume em milímetros cúbicos, devido às grandes diferenças na densidade de materiais. A abrasão é relatada como perda de volume por procedimento especificado.

Figura 14: Esquema do aparato de testes ASTM G65-04, Aparato de testes



Fonte: (a) ASTM G65-04 (b) Aparato de testes Metalab

Para a análise de abrasão, foram confeccionadas as peças em uma fresadora convencional.

Para a realização dos testes de abrasão, pesou-se a amostra com uma balança de precisão (quatro dígitos após a vírgula), em seguida foi configurado o equipamento de ensaio de abrasão para 6000 após o término dos 6000 ciclos a amostra foi novamente pesada na balança de precisão para aferir o quanto de massa se perdeu com o desgaste.

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado atendendo a norma ASTM G-65, com 02 amostras de cada material;

Nesse ensaio, o corpo de prova é pressionado contra a roda giratória e forçado por meio de um braço de alavanca enquanto um fluxo controlado de areia abrasiva é continuamente depositado na superfície de teste. Os corpos de prova são pesados antes e após o teste e a perda de massa fica registrada.

O ensaio pode ser executado através de quatro procedimentos, onde varia o tempo, a rotação da roda e o tipo de material submetido a este ensaio.

Para os materiais em estudo foi realizado o teste utilizando o Procedimentos A, onde é aplicado para classificar materiais metálicos que possuem alta resistência à abrasão, tenham baixa perda de volume.

Tabela 06: Parâmetros de Teste (Conforme Norma ASTM G-65)

Procedimento	Força (N)	Rotação da Roda (RPM)	Tempo (minutos)	Fluxo de areia (g/min)
A	130	6000	30	300 a 400
B	130	2000	10	300 a 400
C	130	100	0,30	300 a 400
D	45	6000	30	300 a 400
E	130	1000	5	300 a 400

Fonte: ASTM G-65

Após a realização de todos os ensaios e testes, apresenta-se os resultados dos mesmos com os comparativos e atendendo a literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os testes e ensaios pode-se realizar as comparações entre os materiais para cada item estudado de acordo com a norma NADCA #207-2018.

4.1 COMPARAÇÕES DAS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS MATERIAIS

A tabela 07 demonstra a composição química dos materiais obtidas no certificado de qualidade de cada fabricante fornecida pela usina.

Tabela 07: Composição química aços AISI H13 Standard, AISI H13 ESR e JIS SKD 61

Materiais Recebidos - Antes do Tratamento Térmico	Material/ Fornecedor	Categoria Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
	AISI H13 Standard	Grade A/H13 Premium	0,40	0,37	0,020	<0,0010	0,84	5,26	1,26	0,83
	AISI H13 ESR	Grade B / H13 Superior	0,38	0,35	0,009	<0,0010	0,91	5,11	1,20	0,82
	JIS SKD 61	Grade A/H13 Premium	0,38	0,40	0,009	0,0010	0,97	5,1	0,84	0,84

Fonte: O Autor, 2021

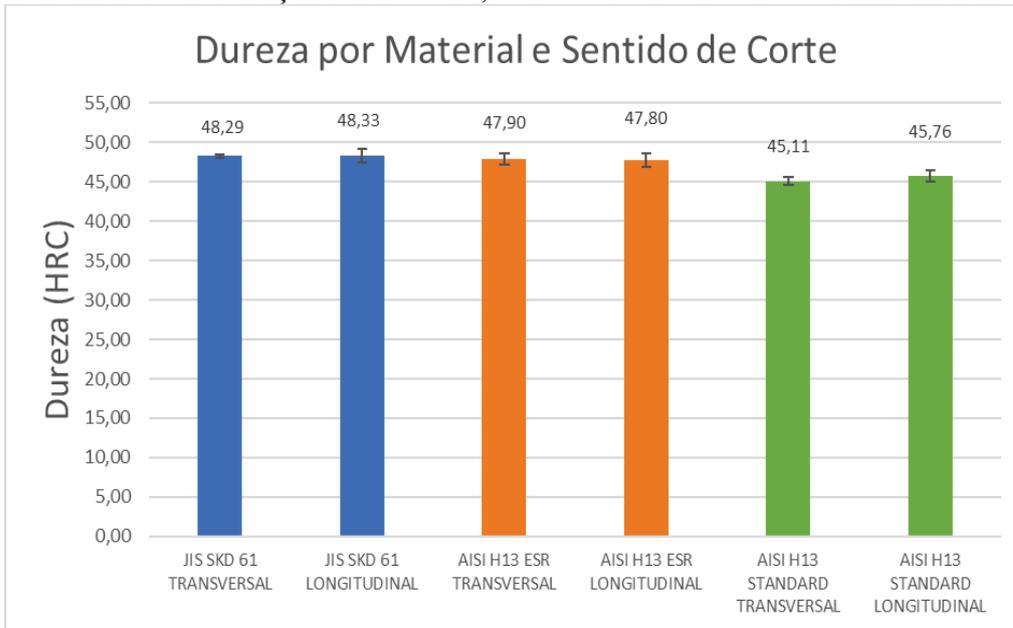
O material JIS SKD 61 e o material AISI H13 Standard estão categorizados pela norma NADCA #207-2018 como materiais da Grade A/H13 Premium, ou seja, uma classe inferior que o material AISI H13 ESR que está categorizado como Grade B/H13 Superior.

Todos os 03 materiais estão de acordo com a composição química de acordo com a norma e cada usina tem seu diferencial ajustando a composição química a fim de otimizar as propriedades mecânicas do seu material.

4.2 DUREZA MATERIAIS

O Gráfico 01, demonstra as médias de dureza por material cortados longitudinal e transversal a laminação, sendo que, as durezas foram transformadas para HRC, pois é a escala usual da indústria.

Gráfico 01: Dureza aços JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard sentido de corte

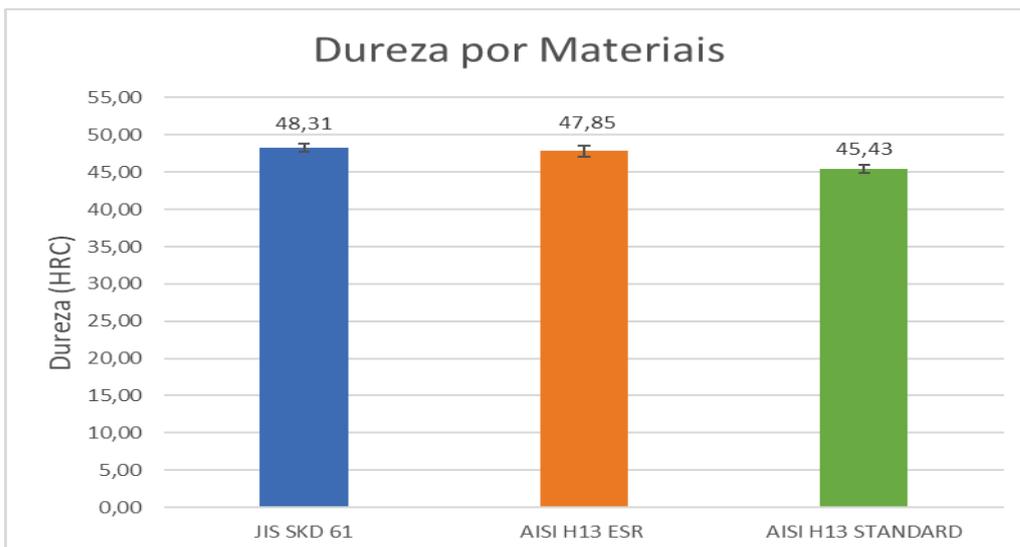


Fonte: O Autor, 2021

Pode-se verificar que o material que apresentou a maior média de dureza por sentido de corte foi o JIS SKD 61 longitudinal a laminação com 48,33 HRC e cortado transversal a laminação 48,29 HRC.

O Gráfico 02, demonstra as médias de medição de dureza por material após tratamento térmico.

Gráfico 02: Dureza aços JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard



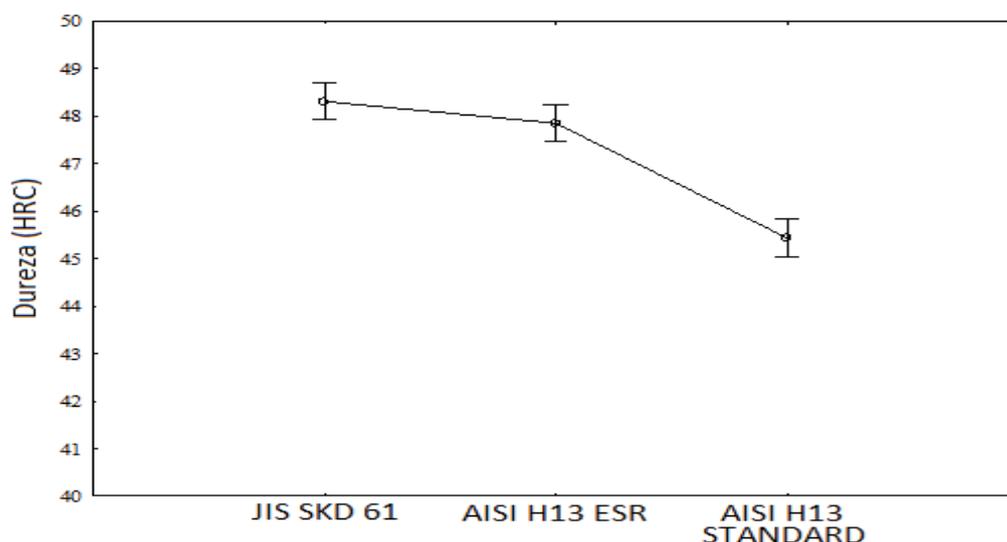
Fonte: O Autor, 2021

Pode-se verificar que o material que apresentou a maior média de dureza foi o JIS SKD 61, com 48,31 HRC. O ciclo de tratamento térmico empregado foi o mesmo para os 3 materiais, o que resultou em variações na dureza, pois há diferenças de composições químicas dos aços. Para que as durezas ficassem na mesma faixa, deveria ter sido realizado um ajuste na temperatura de revenimento conforme cada material. Essa diferença de dureza influencia na comparação das propriedades mecânicas.

O gráfico 03 demonstra a análise de variância comparativa de dureza dos materiais, sendo que, a partir da análise de variância ANOVA com intervalos de confiança de 95%, que estão sendo representados pelo intervalo interno das barras verticais do gráfico 03, é possível observar que os materiais JIS SKD 61 e AISI H13 ESR reportam a mesma dureza porque seus intervalos de confiança se sobrepõem. O processo de tratamento térmico foi realizado com os mesmos parâmetros para os 03 materiais e a composição química dos dois materiais JIS SKD 61 e AISI H13 ESR são equivalentes, porém, os mesmos reportam durezas diferente do material AISI H13 STANDARD.

Desde modo, o material AISI H13 STANDARD apresenta características em sua composição química e processo de fabricação inferior aos outros 02 materiais.

Gráfico 03: Média e intervalos de confiança de dureza dos materiais



Fonte: O Autor, 2021

O gráfico 03 apresenta a comparação de dureza dos materiais de acordo com os dados da Tabela 08, que com a utilização do Teste de Tukey é possível analisar as diferenças entre as durezas dos materiais ao nível de significância de $\alpha=0,05$.

Tabela 08: Teste de Tukey nível de significância ($\alpha=0,05$) para comparar dureza nos 03 materiais

Material	JIS SKD 61 (48,31)	AISI H13 ESR (47,85)	AISI H13 STANDARD (45,43)
JIS SKD 61		0,227540	0,000126
AISI H13 ESR	0,227540		0,000126
AISI H13 STANDARD	0,000126	0,000126	

Fonte: O Autor, 2021

Com esta análise é possível demonstrar que o material JIS SKD 61 é diferente do material AISI H13 STANDARD e igual a AISI H13 ESR, enquanto os materiais AISI H13 ESR e AISI H13 STANDARD são diferentes estatisticamente. Conclui-se que para obter parâmetros de dureza semelhantes em todos os materiais, deverá ser realizado o tratamento térmico individual para cada material.

4.3 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios de impacto Charpy, estão conforme norma ASTM A370, os corpos de provas confeccionados também foram fabricados de acordo com a referida norma.

4.3.1 Ensaio de Impacto Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação)

Os resultados obtidos de energia absorvida dos 04 blocos com 5 corpos de prova cada, totalizando 20 corpos de prova por materiais “JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard” cortados no sentido “longitudinal a laminação”, estes dados foram obtidos pela leitura direta dos valores de energia indicados no equipamento de ensaio de impacto no momento da realização do teste e foram analisados em gráficos de energia absorvida.

Para atendimento da Nadca #207-2018, foram desconsiderados o maior e menor valor de cada bloco de amostra (valores em vermelho), sendo assim, os resultados obtidos de energia absorvida serão de 12 corpos de prova de cada material, conforme Tabela 09.

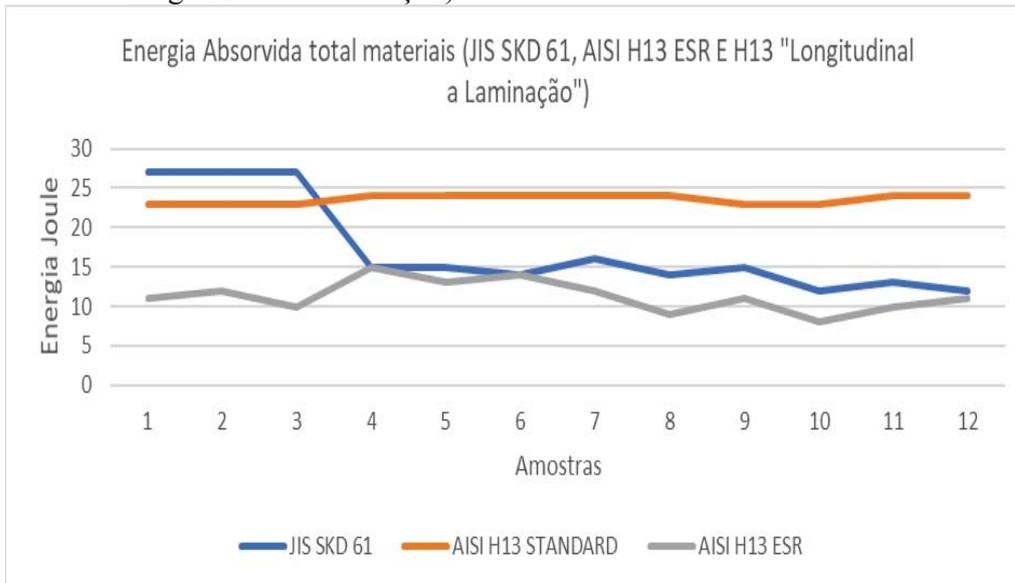
Tabela 09: Energia Absorvida Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação)

Energia Absorvida Ensaio Impacto (Joule)			
Materiais	JIS SKD 61	AISI H13 Standard	AISI H13 ESR
Materiais cortados longitudinal a laminação	27	23	11
	27	23	12
	27	23	10
	15	24	15
	15	24	13
	14	24	14
	16	24	12
	14	24	9
	15	23	11
	12	23	8
	13	24	10
	12	24	11
Média	17,25	23,58	11,33
Desvio Padrão	6,00	0,51	2,02

Fonte: O Autor, 2020

O gráfico 04, demonstra os resultados das 12 amostras de cada material, o material JIS SKD 61 apresentou o maior e menor valor das amostras 27J e 12J, o material AISI H13 ESR apresentou 15J e 8J e o material AISI H13 Standard apresentou 24J e 23J.

Gráfico 04: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal a laminação)



Fonte: O Autor, 2020

Após a exclusão das 02 amostras (maior e menor) no teste de impacto, pode-se observar as diferenças em percentual entre o menor e maior valor registrado por material: JIS SKD 61 apresentou uma variação de 55,56%, o material AISI H13 ESR apresentou uma variação de 46,67% e o material AISI H13 Standard apresentou uma variação de 4,17%. O material que apresentou a menor diferença foi o AISI H13 Standard.

4.3.2 Ensaio de Impacto Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal)

Os resultados obtidos de energia absorvida dos 04 blocos com 5 corpos de prova cada, totalizando 20 corpos de prova dos materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard cortados no sentido “transversal”, estes dados foram obtidos pela leitura direta dos valores de energia absorvida indicados na máquina de ensaio de impacto no momento da realização do ensaio, e foram analisados em gráficos de energia absorvida.

Os resultados de energia absorvida dos 12 corpos de prova dos materiais cortados “transversal” estão representados na Tabela 10.

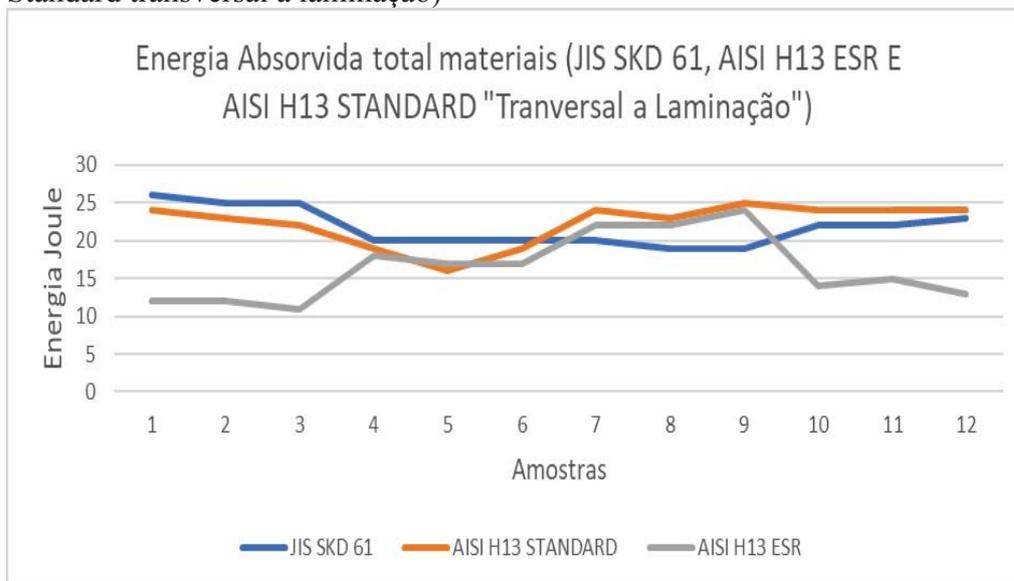
Tabela 10: Energia Absorvida Charpy (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal a laminação)

Energia Absorvida Ensaio Impacto (Joule)			
Materiais	JIS SKD 61	AISI H13 Standard	AISI H13 ESR
Materiais cortados transversal laminação	26	24	12
	25	23	12
	25	22	11
	20	19	18
	20	16	17
	20	19	17
	20	24	22
	19	23	22
	19	25	24
	22	24	14
	22	24	15
	23	24	13
Média	21,75	22,25	16,42
Desvio Padrão	2,49	2,77	4,38

Fonte: O Autor, 2020

O gráfico 05, demonstra os resultados das 12 amostras de cada material, o material JIS SKD 61 apresentou o maior e menor valor das amostras 26J e 19J, o material AISI H13 ESR apresentou 24J e 11J e o material AISI H13 Standard apresentou 25J e 16J.

Gráfico 05: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard transversal a laminação)



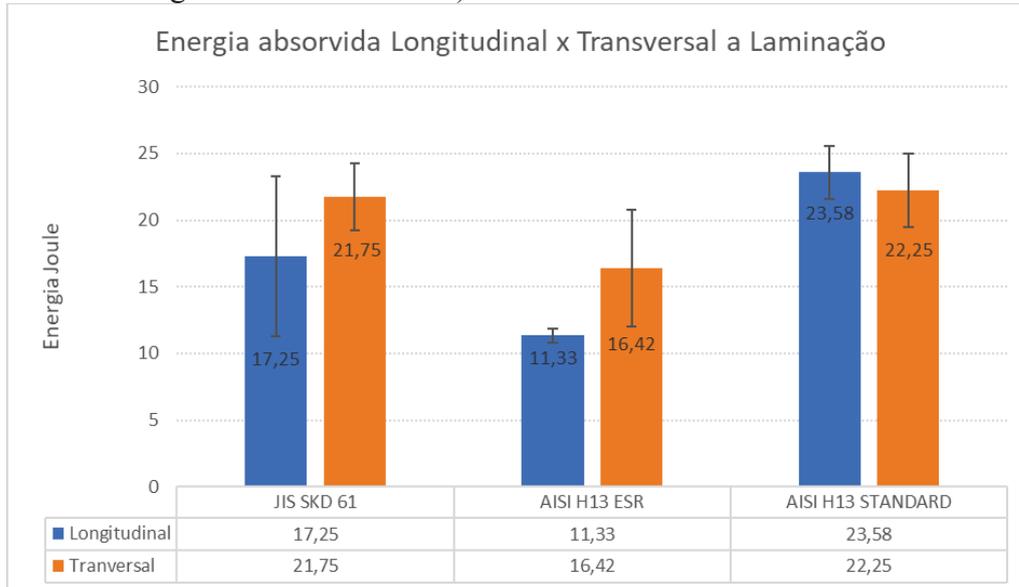
Fonte: O Autor, 2020

Após a exclusão das 02 amostras (maior e menor) no teste de impacto, pode-se observar as diferenças em percentual entre o menor e maior valor registrado por material: JIS SKD 61 apresentou uma variação de 26,92%, o material AISI H13 ESR apresentou uma variação de 54,17% e o material AISI H13 Standard apresentou uma variação de 36,00%. O material que apresentou a menor diferença foi o JIS SKD 61.

4.3.3 Comparação Ensaio de Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal a laminação)

O gráfico 06, demonstra os resultados da média das 12 amostras de cada material (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard), pode-se observar que o material JIS SKD 61 apresentou valor nas amostras sentido longitudinal de 17,25J e transversal de 21,75J, o material AISI H13 ESR apresentou valor nas amostras sentido longitudinal de 11,33J e transversal de 16,42J e o material AISI H13 Standard apresentou o valor nas amostras longitudinal de 23,58J e transversal de 22,25J.

Gráfico 06: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal)



Fonte: O Autor, 2021

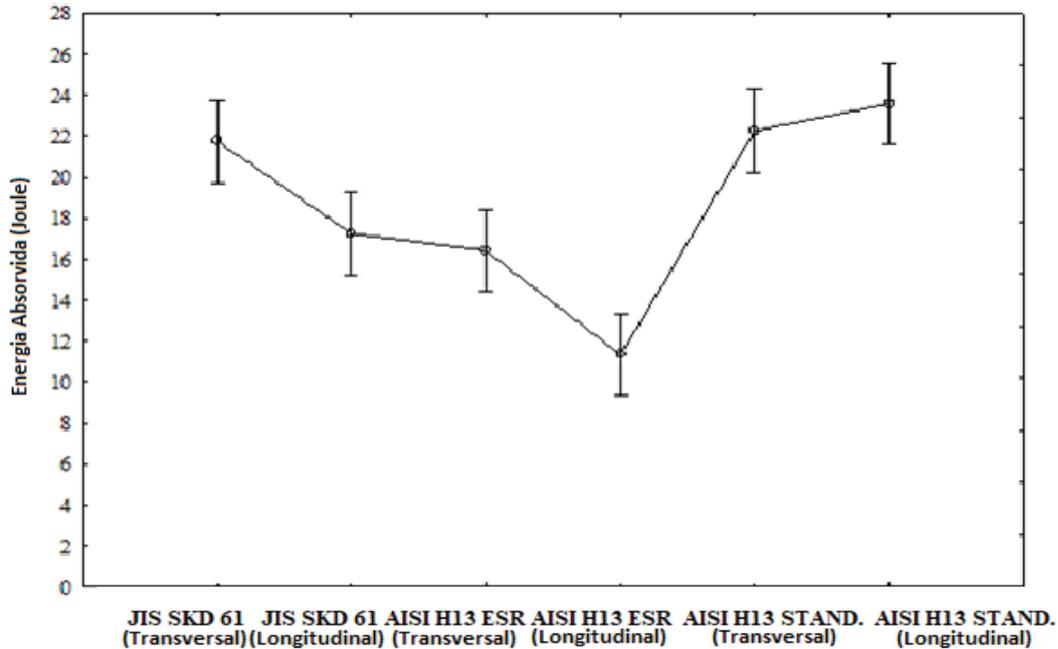
O sentido da laminação influencia na deformação plástica dos materiais. Ocorre um maior alinhamento da estrutura cristalina nesse sentido, fazendo com que o material apresente melhores propriedades mecânicas.

Os valores de energia absorvida para o aço AISI H13 ESR e o aço JIS SKD 61 transversal, obtiveram maiores valores, isso se dá devido a direção do corte do entalhe dos corpos de prova que ficam alinhados na mesma direção da laminação e proporcionam aumento desses valores.

Para possibilitar o desenvolvimento da análise foi utilizado o Software Statistica 10 e utilizado o método Teste de Tukey para comparar os resultados do ensaio de Energia Absorvida nos 03 materiais ao nível de significância ($\alpha=0,05$) a partir da Análise de Variância One-Way “ANOVA”, devido este ser capaz de comparar estatisticamente e simultaneamente a média de diversos casos em estudo.

O Gráfico 07 reporta a média de energia absorvida nos 03 materiais em estudo, sendo que, a partir da análise de variância ANOVA com intervalos de confiança de 95%, que estão sendo representados pelo intervalo interno das barras verticais do gráfico 07, é possível observar que o material AISI H13 STANDARD sentido de corte longitudinal e transversal apresentam maior energia absorvida, seguido pelo material JIS SKD 61 e material AISI H13 ESR.

Gráfico 07: Comparativo de Energia Absorvida no teste de impacto nos 03 materiais



Fonte: O Autor, 2021

A Tabela 11 apresenta o Teste de Tukey ao nível de significância ($\alpha=0,05$) para comparar a Energia Absorvida nos ensaios de impacto pelos diferentes materiais.

Destarte, tem-se que o material AISI H13 STANDARD cortado sentido transversal e AISI H13 STANDARD cortado sentido longitudinal, reportam médias de Energia Absorvida estatisticamente iguais ao nível de significância $\alpha=0,05$, enquanto a comparação entre JIS SKD 61 cortado sentido transversal e JIS SKD 61 cortado sentido longitudinal, são estatisticamente diferentes, na comparação entre AISI H13 ESR cortado sentido transversal e AISI H13 ESR cortado sentido longitudinal também são diferentes, estes resultados devem-se ao processo de tratamento térmico ao qual resultou diferença nas durezas dos materiais.

Na comparação entre os materiais, demonstra que o material AISI H13 STANDARD cortado sentido longitudinal e transversal absorveram mais energia que o material AISI H13 ESR cortado sentido longitudinal e transversal e mais energia que o material JIS SKD 61 cortado sentido longitudinal e transversal, com comparação de mesmo nível de significância.

Realizando a comparação com materiais cortados no sentido longitudinal, demonstra que a Energia Absorvida no material AISI H13 STANDARD é maior do que a energia absorvida pelo material JIS SKD 61, que por sua vez é maior que a energia absorvida pelo material AISI H13 ESR.

Tabela 11: Teste de Tukey ao nível de significância ($\alpha=0,05$) para comparar a Energia Absorvida nos diferentes materiais

Materiais	JIS SKD 61 (transversal) 21,75	JIS SKD 61 (longitudinal) 17,25	AISI H13 ESR (transversal) 16,42	AISI H13 ESR (longitudinal) 11,33	AISI H13 STANDARD (transversal) 22,25	AISI H13 STANDARD (longitudinal) 23,58
JIS SKD 61 (transversal)		0,028299	0,005171	0,000130	0,999330	0,792643
JIS SKD 61 (longitudinal)	0,028299		0,991845	0,001443	0,010468	0,000609
AISI H13 ESR (transversal)	0,005171	0,991845		0,008808	0,001743	0,000181
AISI H13 ESR (longitudinal)	0,000130	0,001443	0,008808		0,000130	0,000130
AISI H13 STANDARD (transversal)	0,999330	0,010468	0,001743	0,000130		0,936311
AISI H13 STANDARD (longitudinal)	0,792643	0,000609	0,000181	0,000130	0,936311	

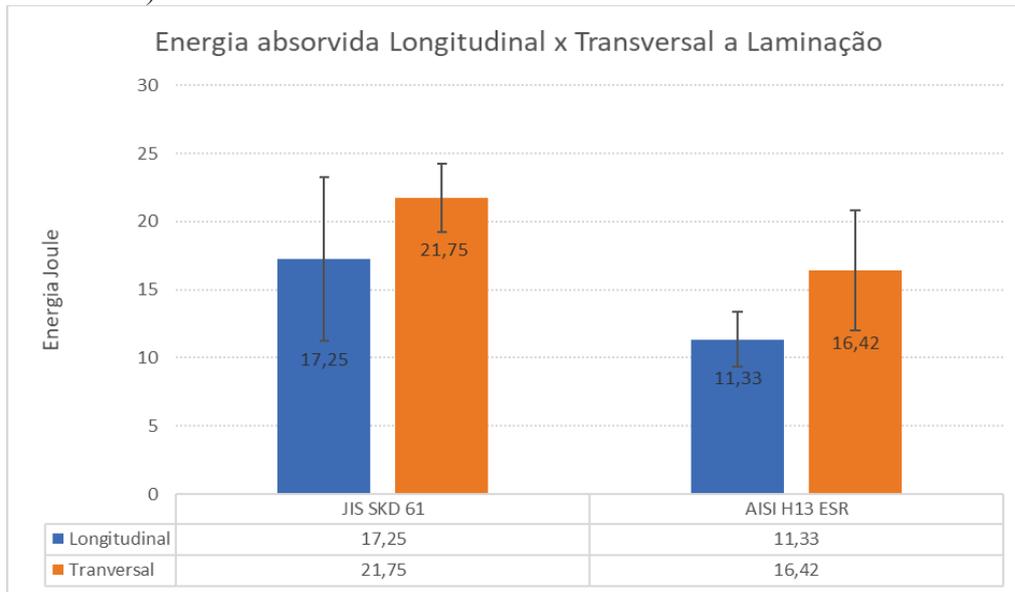
Fonte: O Autor, 2021

Comparando a energia absorvida nos materiais cortados no sentido transversal tem-se que o material JIS SKD 61 e AISI H13 STANDARD, absorveram a mesma energia e ambos absorveram mais energia que o material AISI H13 ESR.

O material AISI H13 ESR cortado no sentido longitudinal apresentou a menor energia absorvida em relação aos demais materiais estudados.

Esse resultado é devido a diferença de dureza entre os materiais, conforme observa-se, quanto menor a dureza maior será a quantidade de energia absorvida no ensaio de impacto, desta forma a dureza do material AISI H13 STANDARD foi a menor entre os 03 materiais em estudo, média 45,43 HRC que conseqüentemente apresentou a maior média de energia absorvida no material cortado sentido longitudinal 23,58 J e transversal 22,25J.

Gráfico 08: Energia Absorvida Ensaio Impacto (JIS SKD 61, AISI H13 ESR longitudinal x transversal)



Fonte: O Autor, 2021

Observa-se que entre os materiais na mesma faixa de dureza, o JIS SKD 61 apresentou maior tenacidade nos dois sentidos.

É importante ressaltar que o processo ESR é popular mundialmente como refinador de estrutura nos aços ferramenta. A norma Nadca utiliza o processo ESR como especificação de graus de qualidade para os aços H13 e o JIS SKD 61 é classificado como Grade A (H13 premium) por não ser ESR.

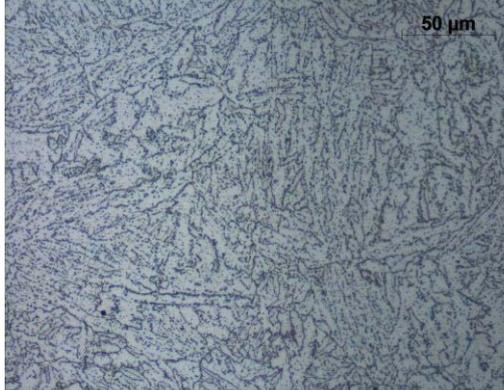
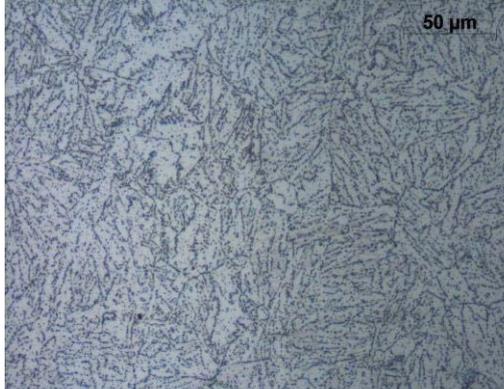
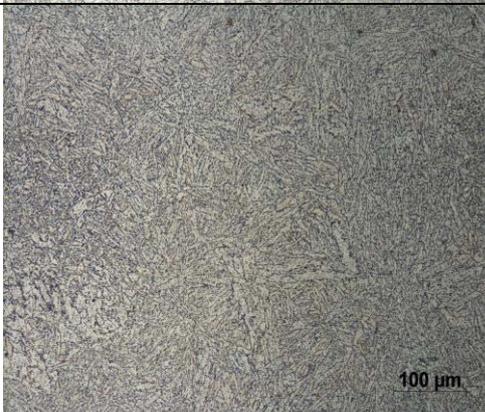
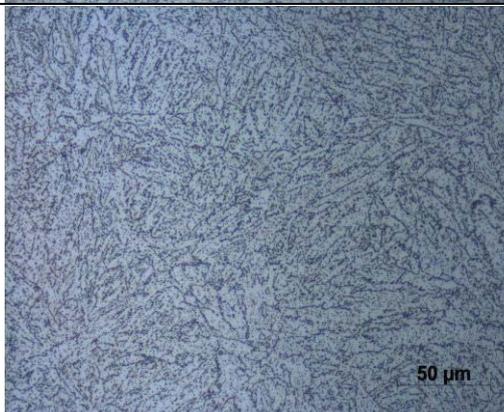
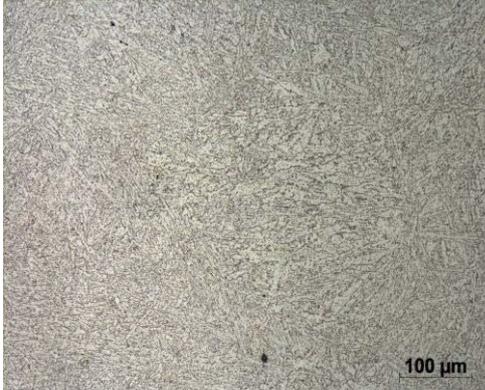
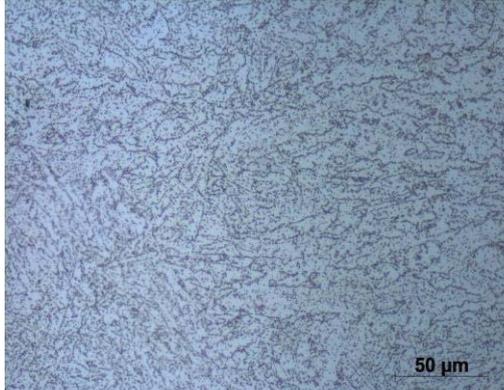
Contudo, esses resultados mostram que o processo de homogeneização aplicado no aço japonês JIS SKD 61, confere melhores propriedades mecânicas do que o processo ESR aplicado no aço AISI H13, desta forma atende as propriedades exigidas para a Grade B na norma Nadca (H13 superior).

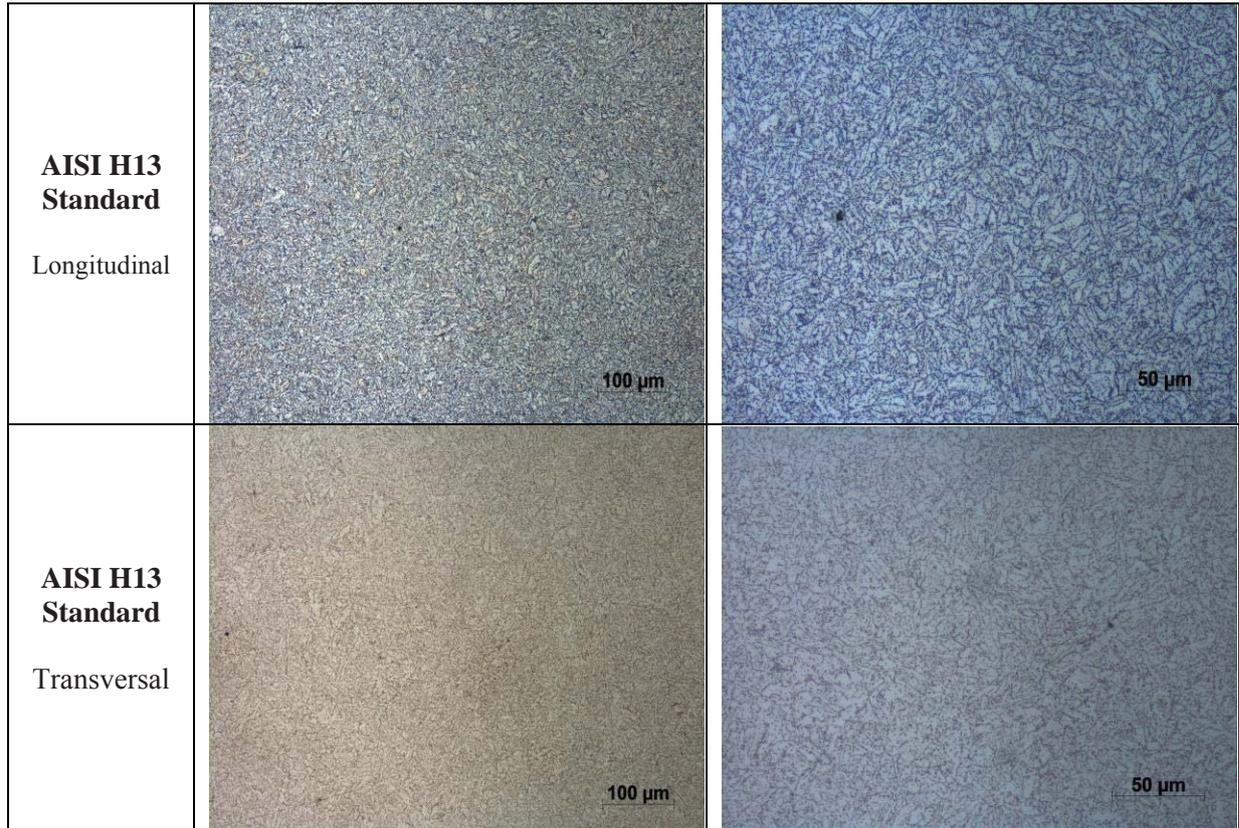
4.4 MICROGRAFIA

Os ensaios metalográficos atendem aos procedimentos de preparação e análise da norma ASTM E-03, as análises metalográfica foram realizadas nos materiais cortados no sentido longitudinal e transversal a laminação na forma recozida e após tratamento térmico.

A figura 15, demonstra as micrografias dos materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard no sentido longitudinal x transversal “recozido” (200X e 500X)

Figura 15: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “recozido” (200X e 500X)

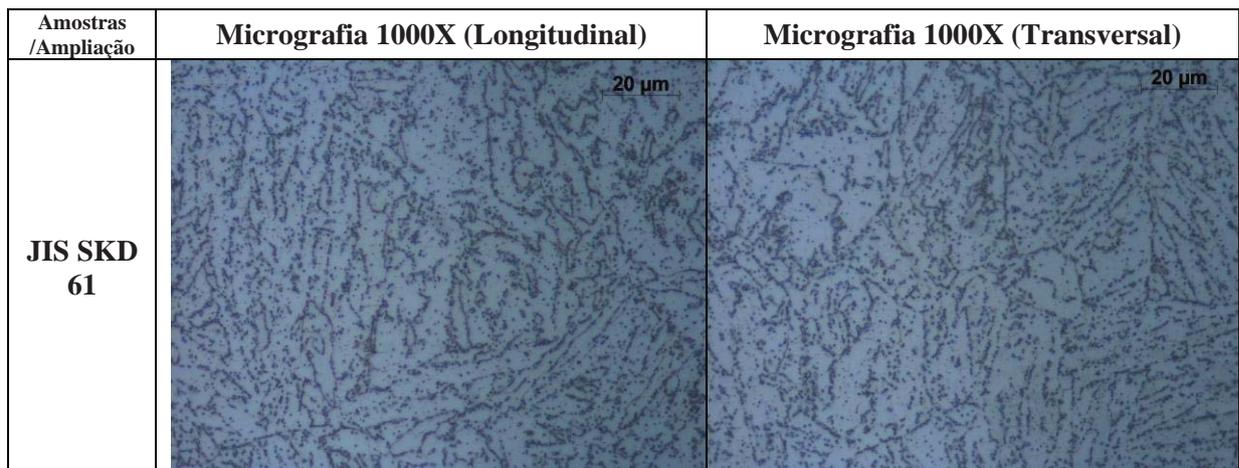
Amostras /Ampliação	Micrografia 200X	Micrografia 500X
<p>JIS SKD 61 Longitudinal</p>		
<p>JIS SKD 61 Transversal</p>		
<p>AISI H13 ESR Longitudinal</p>		
<p>AISI H13 ESR Transversal</p>		

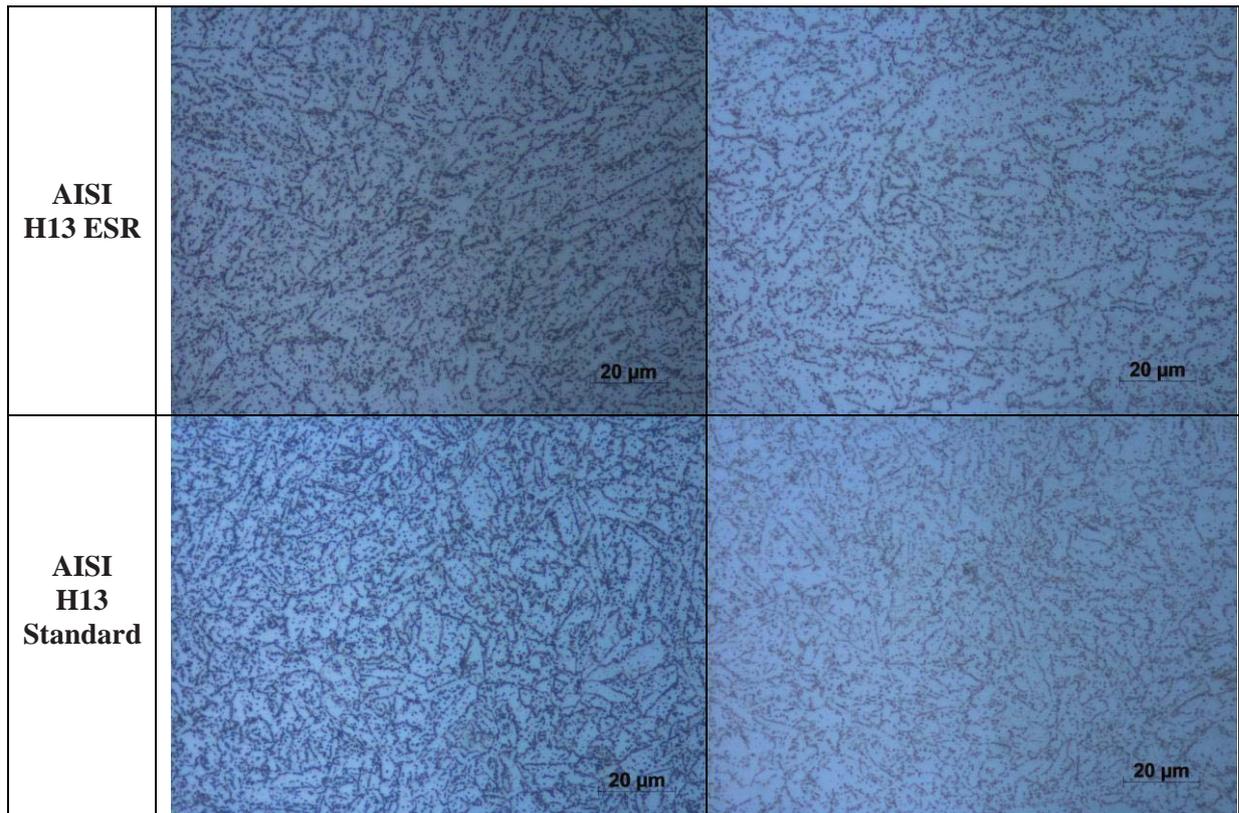


Fonte: O Autor, 2020

A figura 16, demonstra as micrografias dos materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard no sentido longitudinal x transversal “recozido” (1000X)

Figura 16: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “recozido” (1000X)





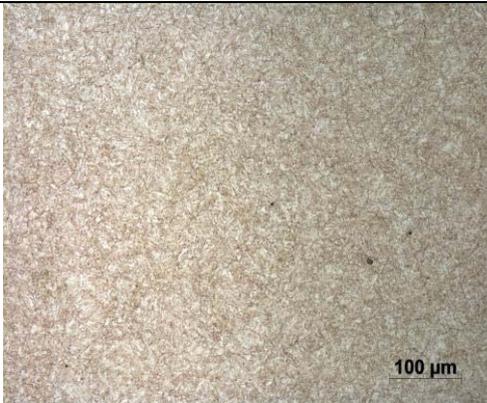
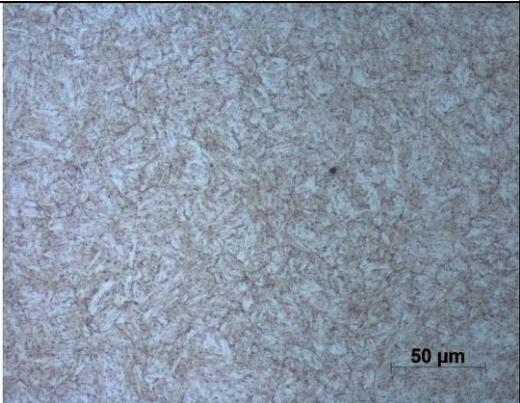
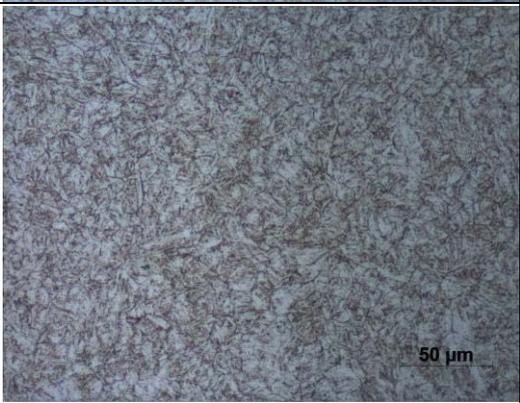
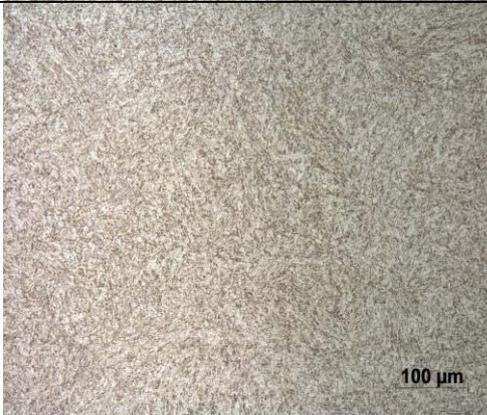
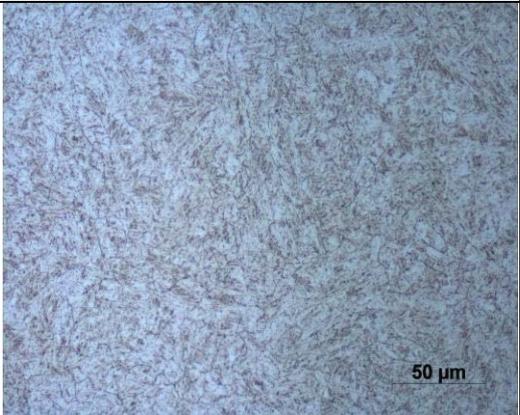
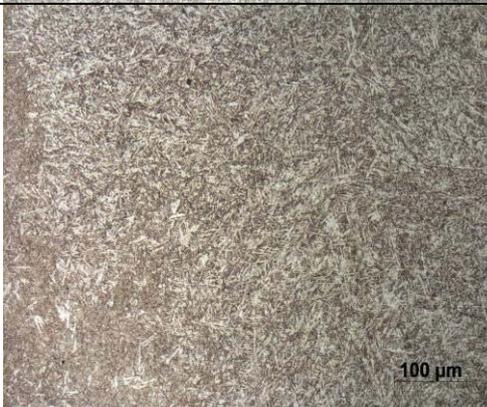
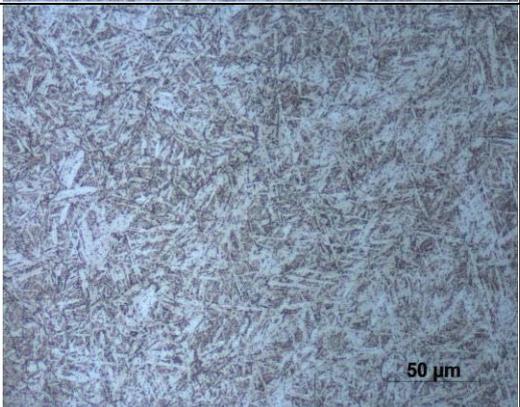
Fonte: O Autor, 2020

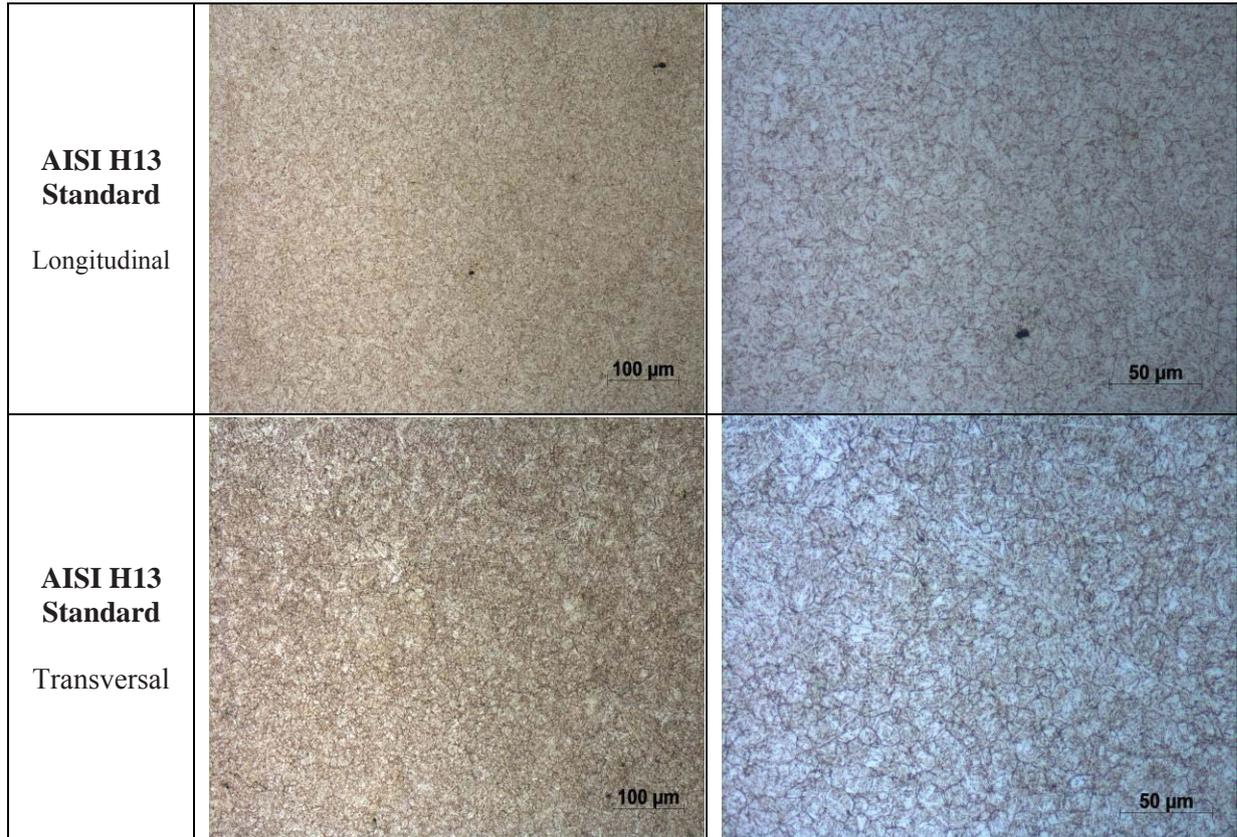
Pode-se verificar que todos os materiais na forma recozida apresentam matriz ferrítica com carbonetos dispersos.

Os materiais analisados JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal e transversal a laminação na forma temperada, os mesmos foram atacados quimicamente com Nital a 5% por 10 Segundos, após, foi realizado microscopia óptica no Microscópio Zeiss com ampliação de 200, 500 e 1000X conforme figura 17 e 18.

A figura 17, demonstra as micrografias dos materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (200X e 500X)

Figura 17: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (200X e 500X)

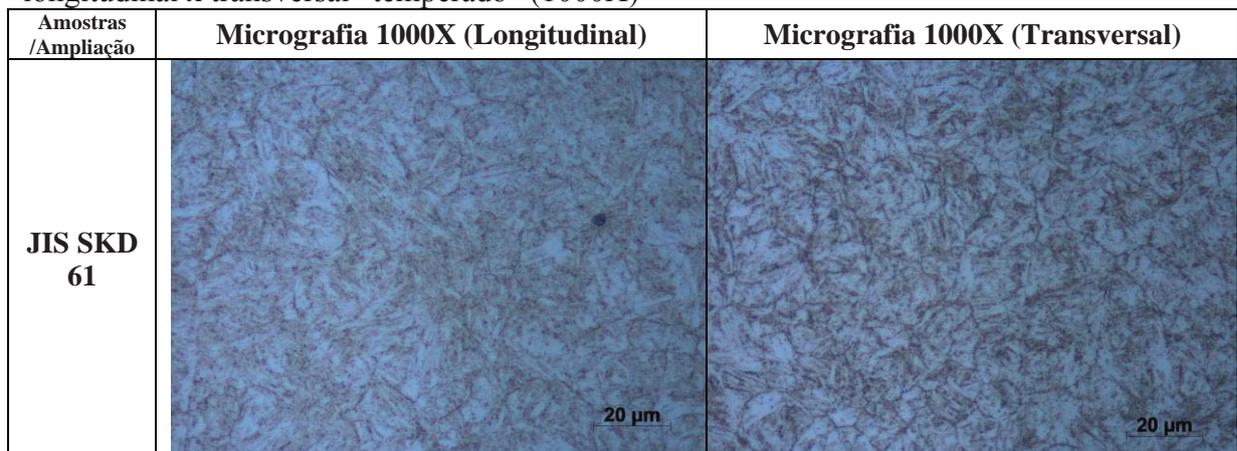
Amostras /Ampliação	Micrografia 200X	Micrografia 500X
<p>JIS SKD 61 Longitudinal</p>		
<p>JIS SKD 61 Transversal</p>		
<p>AISI H13 ESR Longitudinal</p>		
<p>AISI H13 ESR Transversal</p>		

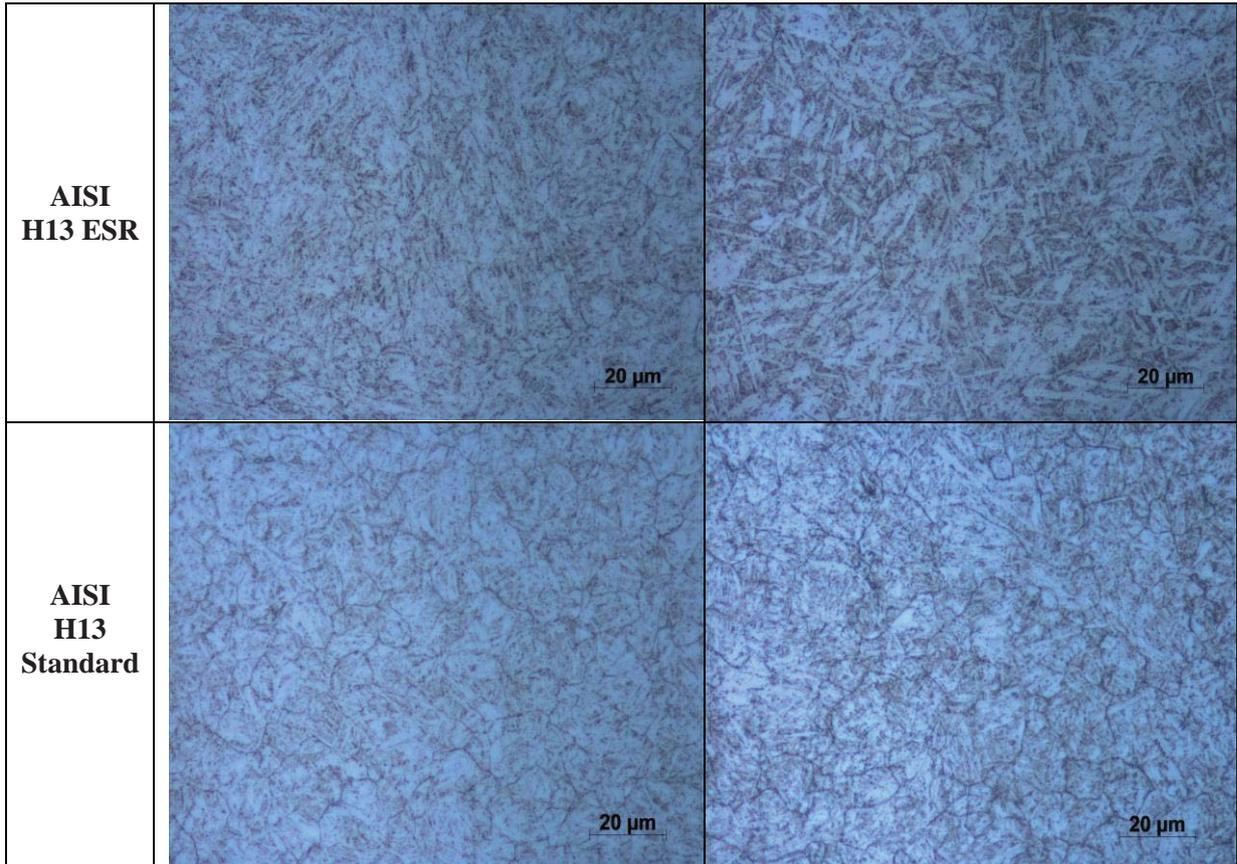


Fonte: O Autor, 2020

A figura 18, demonstra as micrografias dos materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (1000X)

Figura 18: Micrografia materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (1000X)





Fonte: O Autor, 2020

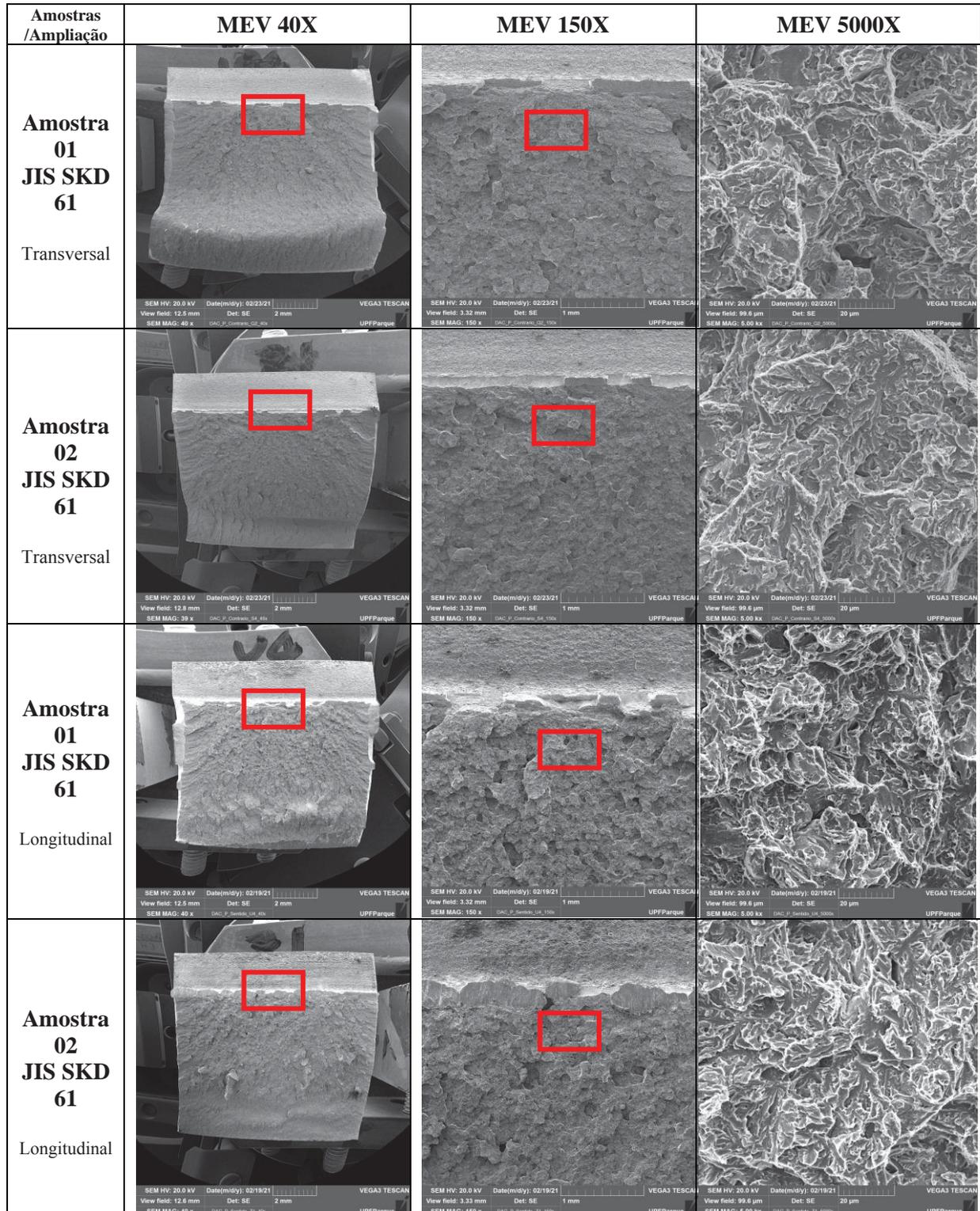
Pode-se verificar que todos os materiais na forma temperada apresentaram microestrutura predominante martensítica revenida.

4.5 MEV

Os materiais analisados JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard longitudinal e transversal a laminação após o processo de tratamento térmico, foi realizada com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Tescan, com ampliação de 40, 150 e 5000X.

A figura 19, apresenta o resultado do material JIS SKD 61 pelo MEV, sendo que, para cada material foi realizado 02 análises por cada material e por sentido de laminação.

Figura 19: MEV material JIS SKD 61, longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X)

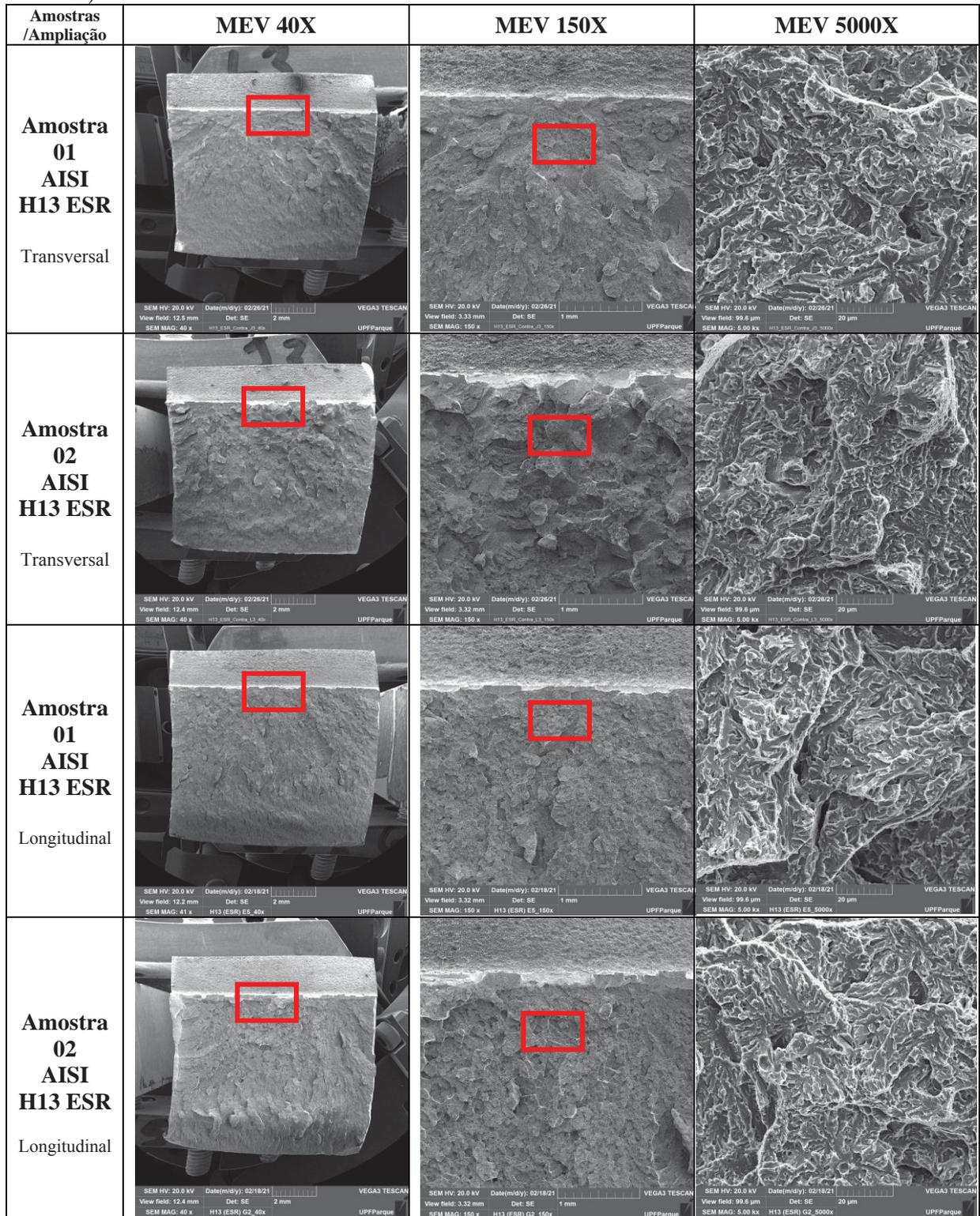


Fonte: O Autor, 2021

Pode-se concluir pelas imagens do MEV que as amostras de JIS SKD 61 apresentaram fratura frágil predominantes por clivagem, que demonstra ser material pouco dúctil.

A figura 20, apresenta o resultado do material AISI H13 ESR pelo MEV, sendo que, foram realizadas 02 análises por material e por sentido de laminação.

Figura 20: MEV material AISI H13 ESR longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X)

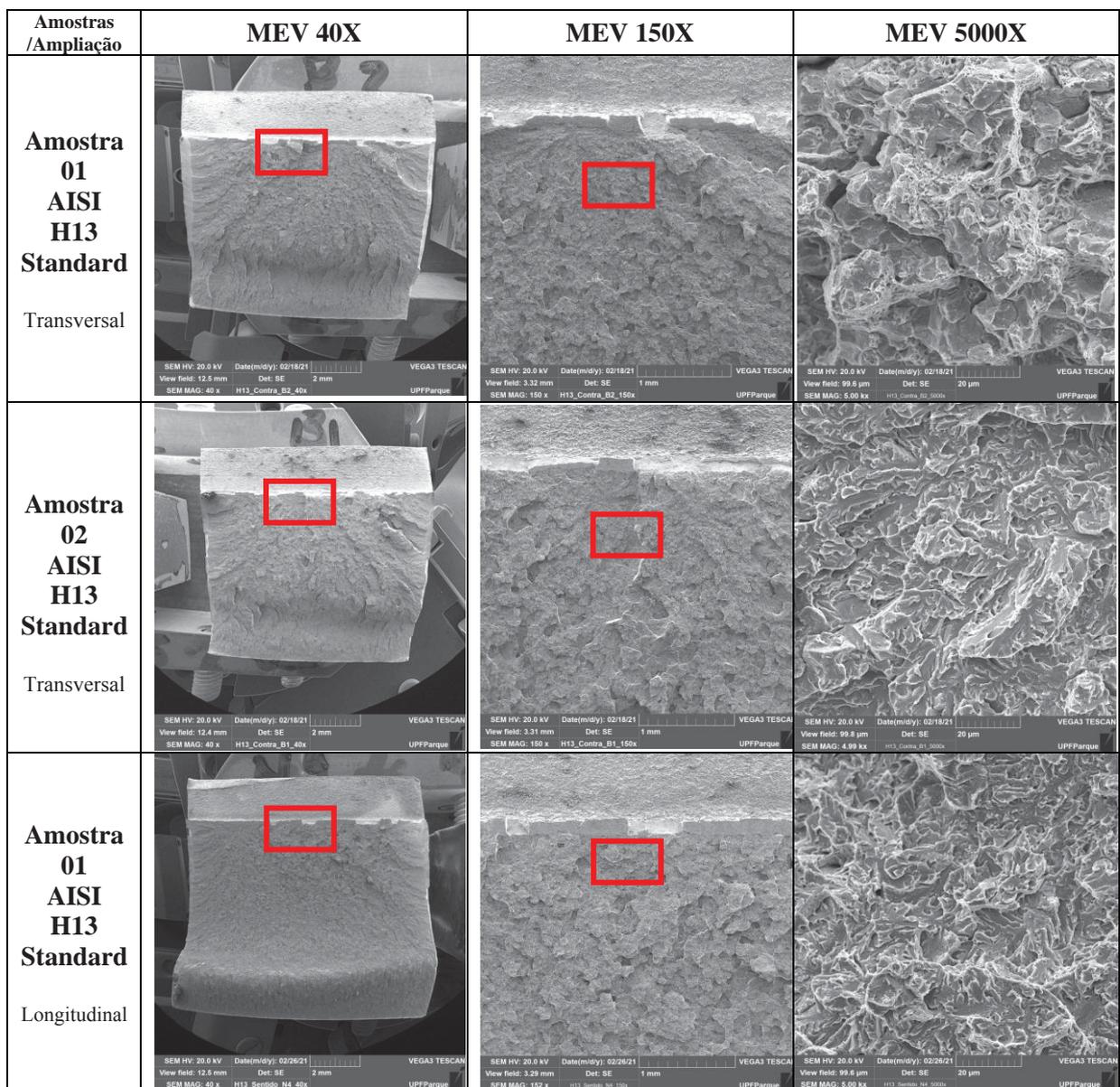


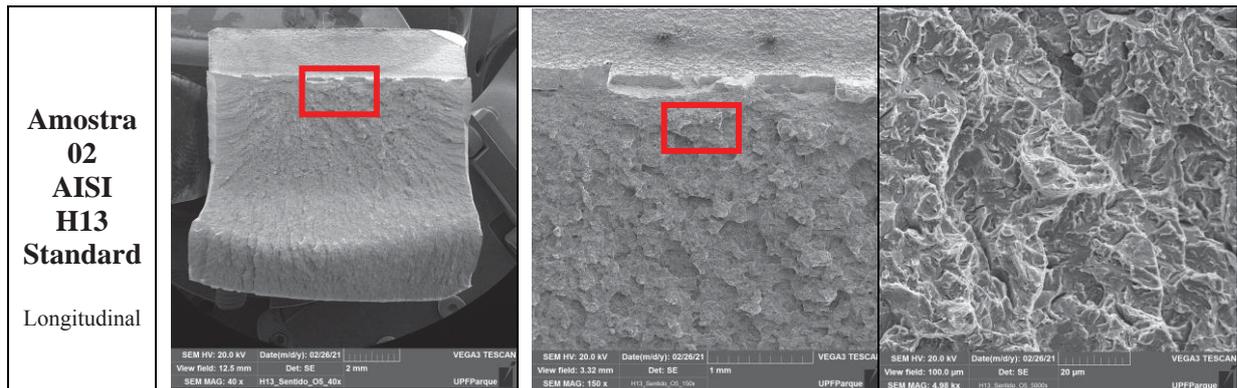
Fonte: O Autor, 2021

Pode-se concluir pelas imagens do MEV que a grande maioria das amostras de AISI H13 ESR apresentaram fratura frágil predominantes por clivagem, que demonstra ser material pouco dúctil, porém, observa-se na amostra 02 longitudinal e amostra 02 transversal, predomina fratura por clivagem, com contornos de grãos e poucos dimples.

A figura 21, apresenta o resultado do material AISI H13 Standard pelo MEV, sendo que, para cada material foi realizado 02 análises por cada material e por sentido de laminação.

Figura 21: MEV material AISI H13 Standard longitudinal x transversal “temperado” (40, 150 e 5000X)





Fonte: O Autor, 2021

Pode-se concluir pelas imagens do MEV que a grande maioria das amostras de AISI H13 Standard, apresentam fratura frágil predominantes por clivagem, que demonstra ser material pouco dúctil, porém, observa-se na amostra 01 transversal, apresenta fratura mista, predominante por clivagem com presença de dimples.

Pelo exposto, nota-se em todos os casos fratura predominantemente frágil, típica desta classe de materiais temperados e revenidos. Há presença predominante de clivagem, com discreta presença de dimples.

A referida análise não evidencia diferença significativa entre os materiais analisados

4.6 ENSAIO DE DESGASTES

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado atendendo a norma ASTM G-65, realizado em 02 amostras de cada material.

Foi utilizado o Procedimentos A da norma ASTM G-65, com uma força aplicada de 130 N, rotação de 6000 RPM, tempo de 30 minutos e fluxo de areia entre 300 a 400 gramas por minutos, este foi utilizado devido os materiais em estudo possuírem alta resistência à abrasão com tendencia de baixa perda de volume.

A Tabela 12, apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de desgaste por abrasão.

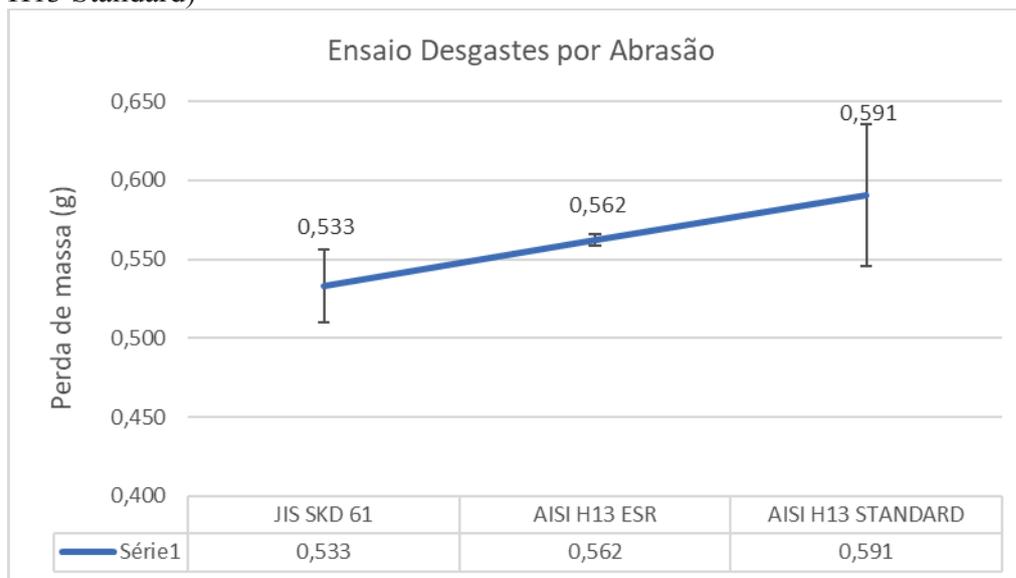
Tabela 12: Resultados Ensaio de Abrasão ASTM G-65

Amostra	JIS SKD 61 1	JIS SKD 61 2	AISI H13 ESR - 1	AISI H13 ESR - 2	AISI H13 Standard - 1	AISI H13 Standard - 2
Massa inicial (g)	106,0494	106,0583	106,5866	106,389	106,5727	106,8242
Massa final (g)	105,4999	105,5413	106,0215	105,8293	105,9501	106,2652
Perda de massa (g)	0,5495	0,5170	0,5651	0,5597	0,6226	0,5590
Perda de volume (mm ³)	72,21	68,66	73,65	73,77	81,07	73,92

Fonte: O autor, 2021

O ensaio de desgaste por abrasão demonstrou que o material JIS SKD 61 perdeu menos massa em média comparado com os materiais AISI H13 ESR e AISI H13 Standard, o gráfico 09, demonstra o desgaste por perda de massa de cada material.

Gráfico 09: Ensaio de desgaste por abrasão dos materiais (JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard)



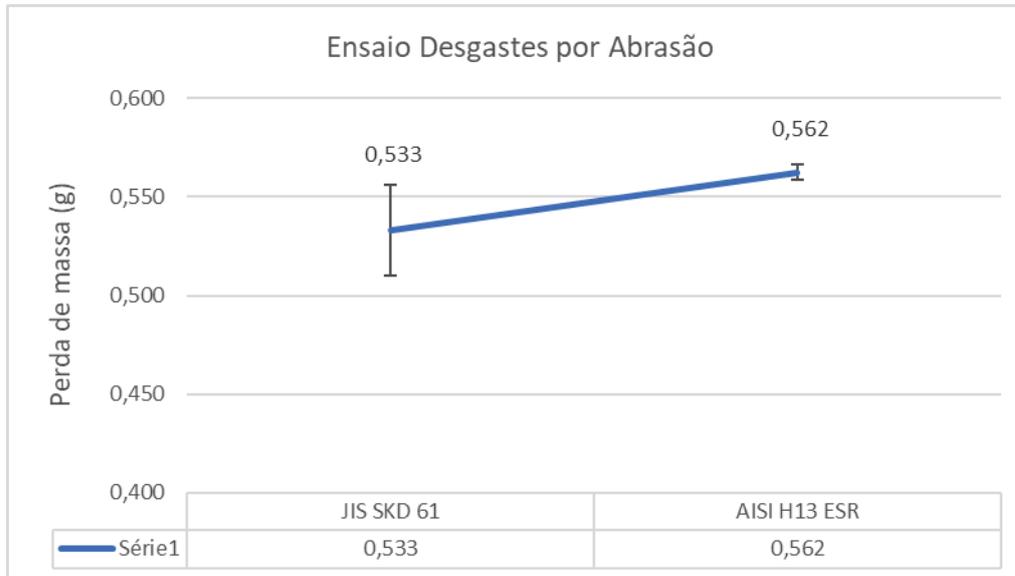
Fonte: O autor, 2021

O material JIS SKD 61 perdeu em média 5,18% menos massa que o AISI H13 ESR e 9,74% menos massa que o material AISI H13 Standard.

Devido o material AISI H13 Standard ter ficado abaixo da faixa de dureza dos outros 2 materiais, não foi possível fazer uma comparação direta entre os materiais estudados.

Desta forma, o gráfico 10 demonstra o comparativo apenas dos materiais JIS SKD 61 e AISI H13 ESR, que estão na mesma faixa de dureza.

Gráfico 10: Ensaio de desgaste por abrasão dos materiais (JIS SKD 61 e AISI H13 ESR)



Fonte: O autor, 2021

O material JIS SKD 61, apresentou menor desgaste abrasivo comparado ao AISI H13 ESR, esse resultado pode ser devido ao ajuste de composição química diferenciada e estrutura refinada do material japonês.

O material JIS SKD 61 possui um processo de fabricação exclusivo da usina japonesa no qual consiste em um ajuste da composição química, processo de refino para controle de impurezas e inclusões, homogeneização e alto grau de forjamento (redução 6:1).

CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstra as análises do comportamento e desempenho dos ensaios e propriedades mecânicas de 03 materiais JIS SKD 61, AISI H13 ESR e AISI H13 Standard, onde, todos os ensaios e testes atendem os requisitos da Norma NADCA 207#2018.

Observa-se que a partir das análises metalográfica/microestrutural dos 03 materiais estudados, na forma recozida, possuem matriz ferrítica com carbonetos dispersos. Após o tratamento térmico apresentam microestruturas predominante martensita revenida, características desta classe de materiais, onde, através da análise em MEV observa-se que o material JIS SKD 61, contém a estrutura mais refinada em comparação aos demais.

Nas análises realizadas em MEV, nota-se em todos os casos fratura predominantemente frágil, típica desta classe de materiais temperados e revenidos, onde é predominante por clivagem, com discreta presença de dimples. A referida análise não evidencia diferença significativa entre os materiais analisados

Constata-se que no ensaio de dureza, o aço AISI H13 Standard apresentou a menor dureza entre os aços JIS SKD 61 e AISI H13 ESR. O material com a maior média de dureza cortado no sentido longitudinal foi o JIS SKD 61 com 48,33 HRC, apresentando também a maior média de dureza cortado no sentido transversal com 48,29 HRC. Ainda o material JIS SKD 61 apresenta a maior média de dureza total com 48,31 HRC, sendo que, apresentou 0,95% maior dureza comparado ao aço AISI H13 ESR e 5,95% maior dureza comparado ao aço AISI H13 Standard. Conclui-se que o processo de tratamento térmico deverá ser realizado individualmente e ajustado com parâmetros específicos de cada material.

Nos resultados de ensaio de resistência ao impacto Charpy o material AISI H13 Standard demonstra ter maior resistência ao impacto em ambos os sentidos de corte, este se deu devido a menor dureza apresentada pelo material. O material AISI H13 Standard cortado sentido longitudinal resultou em 26,86% maior de energia absorvida que o material JIS SKD 61 e 51,94% maior energia absorvida que o material AISI H13 ESR. Já cortado no sentido transversal, o material AISI H13 Standard resultou em 2,25% maior de energia absorvida que o material JIS SKD 61 e 26,22% maior energia absorvida que o material AISI H13 ESR. Comparando os dois materiais na mesma faixa de dureza, o aço JIS SKD 61 apresentou maior resistência ao impacto em relação ao aço AISI H13 ESR. Nesta comparação cortado sentido longitudinal o aço JIS SKD 61 resultou 34,30% maior em energia absorvida que o aço AISI

H13 ESR e cortado no sentido transversal o aço JIS SKD 61 apresentou 24,52% maior energia absorvida, sendo que, esse resultado se dá devido ao processo de fabricação do aço JIS SKD 61. Conclui-se que o aço JIS SKD 61 apresenta melhores propriedades mecânicas comparado ao aço AISI H13 ESR, devido ao processo de homogeneização, redução e controle de inclusões aplicados no aço JIS SKD 61, obtendo maior vantagem comparados ao processo ESR.

No ensaio de desgaste o material AISI H13 ESR perdeu em média 5,18% de massa comparado ao aço JIS SKD 61 e o material AISI H13 Standard perdeu em média 9,74% de massa comparado ao aço JIS SKD 61, ou seja, o material JIS SKD 61 demonstra obter menor desgaste abrasivo comparado aos outros materiais, assim conclui-se, que o aço JIS SKD 61 apresenta maior vida útil entre os materiais estudados.

Sugere-se para trabalhos futuros realizar estudos sobre a tribologia e usinabilidade destes materiais.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Gilvania Tertó. Comportamento de Aço Estrutural API 5L X65 após Exposição ao Hidrogênio: Uma Abordagem Baseada na Fratura Dúctil. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação em Engenharia de Materiais) - Universidade Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. Standard test methods of tension testing of metallic materials.
- ASM, METALS HANDBOOK, Properties and Selection Irons Steels and High-Performance Alloys, vol. 1, 2002.
- ASM, METALS HANDBOOK, Heat Treating, vol. 4, 2002.
- ASM, METALS HANDBOOK, Metallography and Microstructures, vol. 9, 2002.
- ASM, STEEL A HANDBOOK, For materials, 1993
- ASTM G65 – 16E1 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. IT 095 - Ensaio de Abrasão - ASTM G 65.
- BODZIAK, Sabrina. Caracterização do Aço Maraging 300 Fabricado por Fusão Seletiva a Laser. UDESC, Santa Catarina, 2017. (Tese em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ed. LTC, 2005.
- CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- CARLIM NETO, Antonio; MARTINHUK, Felipe. Análise da influência de tratamentos térmicos prévios na nitretação a plasma do aço ferramenta AISI D2. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- COSTA E SILVA, A. L. DA; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmen Isse; MACHADO, Giovanna. Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras, materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. CEMM - Centro de Microscopia e Microanálises do IDÉIAPUCRS - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento ed. PORTO ALEGRE: EDIPUCRS, 2007.

DOERING, A. et al. Evaluation of ASTM G65 abrasive - Spanning 13 years of sand. *Wear, United States*, v. 271, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004316481100144X>>

FACCIO, Milena Tarciana, Estudo da síntese e caracterização de nanopartículas de cobre dispersas em matrizes mesoporosas de Al₂O₃. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Licenciatura em Química). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2016.

FAGUNDES, A. L. da S., BARRETO, J. F. da S., ALMEIDA, N. E. B. de, JUNIOR, S. D., “Análise de Falhas em Aços Ferramenta – Estudo de Casos”. 3º Encontro da Cadeia de Ferramentas Moldes e Matrizes – ABM, São Paulo. 10 a 12 de agosto, 2005.

FERNANDES JR., Paulo. Ensaios metalográficos. Disponível em: <<http://profpaulofj.webs.com/>>

GABARDO, J. Fredolim. Estudo da Tenacidade do aço Ferramenta H13, Dissertação Mestrado Engenharia Mecânica, 2008.

GOBBI, Vagner João. Influência da nitretação a plasma na Resistência ao desgaste microabrasivo do aço Ferramenta AISI D2. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

KELKAR, K. M., PATANKAR, S. V., MITCHELL, A., “Computational Modeling of the Electroslag Remelting (ESR) Process Used for the Production of Ingots of High-Performance Alloys”. International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Santa Fé, USA, 2005.

LI, G., LI, X., WU, J., “Study of the Thermal Fatigue Crack Initial Life of H13 and H21 Steels” *Journal of Materials Processing Technology* 74, 1998.

LUCCHINI SIDERMECCANICA do Aço ESKYLOS 2344, “Aço concebido para Trabalho a Quente”, 2005.

MURTA, Maria Cecília Junqueira. Análise de inclusões não metálicas em aço por espectrometria de emissão óptica associada ao sistema Spark-DAT. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2013

OLIVEIRA, Daniel Lucas. Construção de um equipamento de ensaio de desgaste Micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do Desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

PENHA, Renata Neves; VENDRAMIM, João Carmo; CANALE, Lauralice de Campos Franceschini. Tensões residuais térmicas obtidas da têmpera a vácuo do aço ferramenta AISI H13. *Anais. Porto: FEUP*, 2011.

ROBERTS, G., KRAUSS, G., KENNEDY, R., “Tool Steels. “ASM, 4th edition, EUA, 1980.

ROBERTS, G, KRAUSS, G., KENNEDY, R., “Tool Steels.” ASM, 5th edition, EUA, 1988.

ROCHA, Gabriel Bezerra Teixeira da et al. Análise fractográfica em MEV – fratura dúctil x fratura frágil. Artigo REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2016

SERIACOPI, Vanessa. Simulação numérica do campo de tensões na microestrutura do aço ferramenta AISI H13 durante o forjamento a quente. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

SERNA, Marilene Morelli. Quantificação e Identificação de Carbonetos no Aço Ferramenta AISI/SAE M2. USP, São Paulo, 2008. (Tese em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, A. L. da Costa e, MEI, P. R., “Aços e ligas especiais” 2ª Ed., Editora Edgard Blücher, São Paulo-SP, 2006.

SILVA, João Moreno Vilas Boas de Souza. Adaptação de um sistema automatizado para medição de microdureza. UFRN, Rio Grande do Norte, 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, Pamella Stefanos Da; BOING, Denis. Influência do acabamento da superfície no ensaio de composição química por espectroscopia de emissão óptica. Revista da Unifebe, 2017.

SILVA, P. S. C. P. da, “Comportamento Mecânico e Fratura de Componentes e Estruturas Metálicas”. Apostila, 1999.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Ensaaios mecânicos de materiais metálicos. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

SOUZA, Teófilo Jacob Freitas. Correlação entre as temperaturas de transição dúctil-frágil de corpos de prova convencionais e miniaturizados no ensaio de impacto Charpy dos aços API 5L x 65. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2019

Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies, NADCA, 2018.

STARLING, C. M. D., BRANCO, J. R. T., “Thermal Fatigue of Hot Work Tool Steel with Hard Coatings” p. Thin Solids Films 308-309, 1997.

UDDEHOLM, Catálogos de Aços para Trabalho a Quente.

VALES, Sandra dos Santos. Estudo da Influência do Tratamento Criogênico no Aço AISI H13. USP, São Paulo, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

YOSHIDA, S., Sartori, C. H., Arruda, A. C. “Recomendações para a seleção de aços, Tratamentos Térmicos e Tratamentos de Superfície de Ferramentas de Injeção de Alumínio”. Brasimet Comércio e Indústria S/A, 2004.

ANEXO A

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO - JOINVILLE - SC

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CONFORME EN 10204 3.1

NÚMERO: 00002101137 Pág.: 1/ 1 NOTA FISCAL No.: 000047636 ITEM DA NF: 000001 DATA: 09.10.2020

CLIENTE: 200685 - GILIARDE ALVES

PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA / ITEM: E-MAIL GILIARDE - Sentido Fibra- /

OP CD	LOTE	PEDIDO INTERNO	LIGA VILLARES	LIGA CLIENTE/SIMILAR			
8791105	8772034001	10389932/10	VH13ISO	ASTM A681 (H13)			
NORMAS ATENDIDAS							
NADCA 207 / 2016							
DESCRIÇÃO DO MATERIAL - VILLARES				COMPRIMENTO			
Barra Chato Canto Vivo Forjados FESQ RCZ VH13ISO 13,00 x 58,00 x 85,00				mm			
PESO/kg	QUANT.	UNIDADE	PRODUTO	TRATAMENTO TÉRMICO	ACABAMENTO		
2,800	4	KG	BARRA	Recozido	Fresado (Esquadrejado)		
PROCESSO DE FUSÃO			LINHA DE PRODUTO	CORRIDA			
FORNO ELÉTRICO A ARCO + VD			Forjados	480851			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)							
Análise química na liga							
C 0.40	Si 0.84	Mn 0.37	P 0.020	S <0.0010	Cr 5.26	Mo 1.26	Ni 0.19
V 0.83	W 0.05	Cu 0.07	Nb <0.01	Al 0.023	B <0.0005	Pb <0.0025	Sn <0.0050
As <0.005	Bi <0.005	H <0.00010	N 0.0143				
Dureza (Norma ASTM A370)							
Resultado: 204.2 HBW							
Ultrassom (Norma ASTM A388)							
Situação: Aprovado							
Inspecção visual e dimensional							
Situação: Aprovado							
Teste anti-mistura							
Situação: Aprovado							
A VILLARES METALS DECLARA QUE ESTE PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM AS ESPECIFICAÇÕES DO PEDIDO DE COMPRA							
CNPJ 42.568.752/0008-30 - CD JOINVILLE-SC R. Dona Francisca, 8300 - BLOCO C7 89219-600 - Joinville - SC - BRAZIL Fone: 0800 707 0577 / 0800 19 0577 E-mail: cac@villaresmetals.com				04.11.2020  Cristiane Siqueira Gonçalves			
PRESTAMOS SERVIÇOS DE TRATAMENTO TÉRMICO. CONSULTE-NOS.							

Fonte: Fabricante, 2020

ANEXO B

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO - JOINVILLE - SC

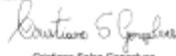
CERTIFICADO DE QUALIDADE

CONFORME EN 10204 3.1

NÚMERO: 000002101141 Pág.: 1/ 1 NOTA FISCAL No.: 000047636 ITEM DA NF: 000002 DATA: 09.10.2020

CLIENTE: 200685 - GILIARDE ALVES

PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA / ITEM: E-MAIL GILIARDE - Contra Fibra- /

OP CD	LOTE	PEDIDO INTERNO	LIGA VILLARES	LIGA CLIENTE/SIMILAR			
8791105	8772034001	10389932/20	VH13ISO	ASTM A681 (H13)			
NORMAS ATENDIDAS							
NADCA 207 / 2016							
DESCRIÇÃO DO MATERIAL - VILLARES				COMPRIMENTO			
Barra Chato Canto Vivo Forjados FESQ RCZ VH13ISO 13,00 x 58,00 x 85,00				mm			
PESO/kg	QUANT.	UNIDADE	PRODUTO	TRATAMENTO TÉRMICO	ACABAMENTO		
2,700	4	KG	BARRA	Recozido	Fresado (Esquadrejado)		
PROCESSO DE FUSÃO			LINHA DE PRODUTO	CORRIDA			
FORNO ELÉTRICO A ARCO + VD			Forjados	4800851			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)							
Análise química na liga							
C 0.40	Si 0.84	Mn 0.37	P 0.020	S <0.0010	Cr 5.26	Mo 1.26	Ni 0.19
V 0.83	W 0.05	Cu 0.07	Nb <0.01	Al 0.023	B <0.0005	Pb <0.0025	Sn <0.0050
As <0.005	Bi <0.005	H <0.00010	N 0.0143				
Dureza (Norma ASTM A370)							
Resultado: 204.2 HBW							
Ultrassom (Norma ASTM A388)							
Situação: Aprovado							
Inspecção visual e dimensional							
Situação: Aprovado							
Teste anti-mistura							
Situação: Aprovado							
A VILLARES METALS DECLARA QUE ESTE PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM AS ESPECIFICAÇÕES DO PEDIDO DE COMPRA							
CNPJ 42.588.752/0008-30 - CD JOINVILLE-SC R. Dona Francisca, 8300 - BLOCO C7 89219-600 - Joinville - SC - BRAZIL Fone: 0800 707 0577 / 0800 19 0577 E-mail: cac@villaresmetals.com				04.11.2020  Cristiano Siqueira Gonçalves			
PRESTAMOS SERVIÇOS DE TRATAMENTO TÉRMICO. CONSULTE-NOS.							

Fonte: Fabricante, 2020

ANEXO C

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO - JOINVILLE - SC

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CONFORME EN 10204 3.1

NÚMERO: 000002101596 Pág.: 1/ 1 NOTA FISCAL No.: 000047636 ITEM DA NF: 000003 DATA: 09.10.2020

CLIENTE: 200685 - GILIARDE ALVES

PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA / ITEM: E-MAIL GILIARDE - Sentido Fibrá - /

OP CD	LOTE	PEDIDO INTERNO	LIGA VILLARES	LIGA CLIENTE/SIMILAR			
8791107	8705058001	10389932/30	VH13IM	ASTM A681 (H13 ESR)			
NORMAS ATENDIDAS							
NADCA 207 / 2018							
DESCRIÇÃO DO MATERIAL - VILLARES				COMPRIMENTO			
Barra Chato Canto Vivo Forjados FESQ RCZ VH13IM 13,00 x 58,00 x 85,00				mm			
PESO/kg	QUANT.	UNIDADE	PRODUTO	TRATAMENTO TÉRMICO	ACABAMENTO		
2,900	4	KG	BARRA	Recozido	Fresado (Esquadrejado)		
PROCESSO DE FUSÃO			LINHA DE PRODUTO	CORRIDA			
FEA + ESR			Forjados	5505587			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)							
Análise química na liga							
C 0.38000	Si 0.91	Mn 0.35	P 0.009	S <0.0010	Cr 5.11	Mo 1.20	V 0.82
Nb <0.01	B <0.0005	Pb <0.0025	Sn <0.0050	As <0.005	Bi <0.005	Se <0.005	
Microestrutura (Norma NADCA)							
Situação: Aprovado : APROVADA CONFORME NADCA #207-2016, MICROESTRUTURA: A57, BAND.: APROVADO							
Microinclusão (Norma ASTM E45)							
A Fina: 0.00		B Fina: 1.00		C Fina: 0.00			
D Fina: 1.00		A Grossa: 0.00		B Grossa: 0.00			
C Grossa: 0.00		D Grossa: 0.00					
(ASTM E45 METHOD A)							
Impacto na amostra tratada (Norma NADCA)							
Corpo de prova nº: 128879		Tipo do CP: Charpy-V		Temperatura: 23.1 °C			
Sentido 1: Transversal		Valor 1A: 14,80 J		Valor 1B: 12,70 J			
Valor 1C: 13,50 J		Valor Médio 1: 13,67 J					
Dureza (Norma ASTM E10)							
Resultado: 212.2 HBW							
Ultrassom (Norma ASTM A388)							
Situação: Aprovado							
Inspecção visual e dimensional							
Situação: Aprovado							
Teste anti-mistura							
Situação: Aprovado							
A VILLARES METALS DECLARA QUE ESTE PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM AS ESPECIFICAÇÕES DO PEDIDO DE COMPRA							
CNPJ 42.588.752/0008-30 - CD JOINVILLE-SC R. Dona Francisca, 8300 - BLOCO C7 89219-800 - Joinville - SC - BRAZIL Fone: 0800 707 0577 / 0800 19 0577 E-mail: cac@villaresmetals.com				04.11.2020  Cristiano S. Gonçalves			
PRESTAMOS SERVIÇOS DE TRATAMENTO TÉRMICO. CONSULTE-NOS.							

Fonte: Fabricante, 2020

ANEXO D

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO - JOINVILLE - SC

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CONFORME EN 10204 3.1

NÚMERO: 000002101601 Pág.: 1/ 1 NOTA FISCAL No.: 000047636 ITEM DA NF: 000004 DATA: 09.10.2020

CLIENTE: 200685 - GILIARDE ALVES

PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA / ITEM: E-MAIL GILIARDE - Contra Fibra- /

OP CD	LOTE	PEDIDO INTERNO	LIGA VILLARES	LIGA CLIENTE/SIMILAR			
8701108	8700058001	10380032/40	VH13IM	ASTM A081 (H13 ESR)			
NORMAS ATENDIDAS							
NADCA 207 / 2016							
DESCRIÇÃO DO MATERIAL - VILLARES				COMPRIMENTO			
Barra Chato Canto Vivo Forjados FESQ RCZ VH13IM 13,00 x 58,00 x 85,00				mm			
PESO/kg	QUANT.	UNIDADE	PRODUTO	TRATAMENTO TÉRMICO	ACABAMENTO		
2,900	4	KG	BARRA	Recozido	Fresado (Esquadrejado)		
PROCESSO DE FUSÃO			LINHA DE PRODUTO		CORRIDA		
FEA + ESR			Forjados		5505587		
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)							
Análise química na liga							
C 0.38000	Si 0.01	Mn 0.35	P 0.009	S <0.0010	Cr 5.11	Mo 1.20	V 0.82
Nb <0.01	B <0.0005	Pb <0.0025	Sn <0.0050	As <0.005	Bi <0.005	Se <0.005	
Microestrutura (Norma NADCA)							
Situação: Aprovado : APROVADA CONFORME NADCA #207-2016, MICROESTRUTURA: AS7, BAND.: APROVADO							
Microinclusão (Norma ASTM E45)							
A Fina: 0.00		B Fina: 1.00		C Fina: 0.00			
D Fina: 1.00		A Grossa: 0.00		B Grossa: 0.00			
C Grossa: 0.00		D Grossa: 0.00					
(ASTM E45 METHOD A)							
Impacto na amostra tratada (Norma NADCA)							
Corpo de prova nº: 128879		Tipo do CP: Charpy-V		Temperatura: 23.1 °C			
Sentido 1: Transversal		Valor 1A: 14,80 J		Valor 1B: 12,70 J			
Valor 1C: 13,50 J		Valor Médio 1: 13,67 J					
Dureza (Norma ASTM E10)							
Resultado: 212.2 HBW							
Ultrassom (Norma ASTM A368)							
Situação: Aprovado							
Inspecção visual e dimensional							
Situação: Aprovado							
Teste anti-mistura							
Situação: Aprovado							
A VILLARES METALS DECLARA QUE ESTE PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM AS ESPECIFICAÇÕES DO PEDIDO DE COMPRA							
CNPJ 42.566.752/0008-30 - CD JOINVILLE-SC R. Dona Francisca, 8300 - BLOCO C7 89219-600 - Joinville - SC - BRAZIL Fone: 0800 707 0577 / 0800 19 0577 E-mail: cnc@villaresmetals.com				04.11.2020  Cristiano Sales Gonçalves			
PRESTAMOS SERVIÇOS DE TRATAMENTO TÉRMICO. CONSULTE-NOS.							

Fonte: Fabricante, 2020

ANEXO E

Certificado de Qualidade**Dados do Cliente**

Cliente: GILIARDE ALVES (008157/01)
Endereço: RUA PEDRO GAIO, 30 APTO 101
Município/U.F.: VIDEIRA/SC
Cep: 89.560-000
CNPJ: 04437698932
Bairro: CENTRO
Suframa:

Dados do Faturamento

Emissão: 06/03/2020
Pedido Hitachi: 014511
Nota: 000015989 / 2
Item: 01
Descrição: ACO DAC P - BR RETANGULAR
Ped. Cliente:
OS/POS: 1A
Perfil: RETANGULAR
N° Peças: 1
Dimensões: 13x64x115
Peso (KG): 0,8

Informações Técnicas

Corrida (Lote): AUTO0005282
Observações:

Composição Química:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Al
0,3800	0,9700	0,4000	0,0090	0,0010	5,1000	0,0000	1,2400	0,8400	0,0000	0,0000

Ti	Cu	Nb	B	N	Out
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Dureza: 179 HBW
Estado de Fornecimento: RECOZIDO
Teste de Ultrassom: Aprovado

Fonte: Fabricante, 2020

ANEXO F

NADCA Grade & Type	Hardening/Austenitizing Temperature		"Annealed" Steel Capability CVN*, ft-lbs (J)		"Class 1" Hardened Steel CVN**, ft-lbs (J)	
	°F	°C	Avg	Min	Avg	Min
A1885	1885	1030	8 (10.8)	6 (8.1)	na	na
B1885	1885	1030	10 (13.6)	8 (10.8)	8 (10.8)	6 (8.1)
C1885	1885	1030	10 (13.6)	8 (10.8)	8 (10.8)	6 (8.1)
C1870	1870	1020	10 (13.6)	8 (10.8)	8 (10.8)	6 (8.1)
C1850	1850	1010	18.45 (25)	14.7 (20)	14.7 (20)	11.7 (16)
D1830	1830	1000	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
E1885	1885	1030	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
E1850	1850	1010	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
E1825	1825	995	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
E1810	1810	990	20 (27)	17 (23)	16 (21.7)	14 (19)
F1885	1885	1030	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
G1850	1850	1010	14 (19)	11 (14.9)	11 (14.9)	9 (12.2)
H1885	1885	1030	14	11	14	11

Note: Recommended preheating temperatures for specific grades of steel can be found in the Cross Reference Guide located in the back of this document.
*Capability toughness after oil quench and minimum double temper (triple tempered preferred) to 44/46 HRC
**Toughness of test coupon removed from detail after commercial vacuum hardening; minimum double tempered (triple tempered preferred) to 44/46 HRC.

Fonte: Nadca #207, 2018

ANEXO G

	RELATÓRIO DE ENSAIO		
	3365 / 21		
Cliente:	GILIARDE ALVES	Nota Fiscal:	--
Solicitante:	Giliarde Alves	Pedido/OC:	--
E-mail:	giliarde.alves@brf.com	Entrada em:	28/04/2021
Natureza do Ensaio/análise:	Inspeção de Material		

INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE:

Tipo de Amostra:	Corpo de Prova
Material:	Aço
Quantidade de Amostras:	08
Descrição:	Amostras 1 e 2: DAC P Amostras 3 e 4: H13 ESR Amostras 5 e 6: H13
Informações Adicionais:	--

1. ENSAIO DE ABRASÃO

Tabela I: Resultados obtidos no ensaio de abrasão

Amostra	1	2	3	4	5	6
Largura (mm)	25,05	25,07	25,09	25,07	25,08	25,09
Espessura (mm)	10,00	10,15	10,01	10,11	10,00	10,18
Comprimento (mm)	55,09	55,08	55,02	55,03	55,01	55,02
Volume dos CP (mm ³)	13800	14016	13818	13948	13797	14053
Volume dos CP (cm ³)	13,80	14,02	13,82	13,95	13,80	14,05
Massa inicial (g)	106,0494	106,0583	106,5866	106,3890	106,5727	106,8242
Massa final (g)	105,4999	105,5413	106,0215	105,8293	105,9501	106,2852
Densidade (g/cm ³)	7,61	7,53	7,67	7,59	7,68	7,58
Perda de massa (g)	0,5495	0,5170	0,5651	0,5597	0,6226	0,5390
Perda de volume (mm ³)	72,21	68,66	73,65	73,77	81,07	73,92

Métodos/Equipamentos:

Preparação:	CPs confeccionados pelo cliente.
Metodologia:	ASTM G65 – 16E1 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. IT 095 - Ensaio de Abrasão - ASTM G 65.
Informações adicionais:	Procedimento A. Tempo de ensaio 30min. Força aplicada 130N. Fluxo de areia: 355g/min.
Equipamento:	<ul style="list-style-type: none"> > Máquina de abrasão por areia e disco de borracha. > Balança Analítica Shimadzu, mod. AY220. Código Metalab: BL-01. Certificado de Calibração (RBC): NºS503430/2020 K&L. Validade: 11/2021. > Cronômetro, mod. RS-013-Inconterm. Código:CRO-05. Certificado de calibração(RBC): Nº J015069/2021 K&L. Validade:03/2022. > Paquímetro, mod.Digital, Digmess. Código:PQ-04. Certificado de Calibração(RBC):NºJ007504/2021 K&L. Validade: 02/2022.

Declaração de Conformidade:

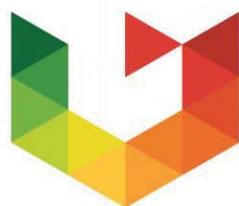
Resultados somente reportados, sem caráter de aprovação ou rejeição de material.

Data de emissão, 28 de abril de 2021.

Elaborado por:



Marcio de Rosal
 CREA/SC 123290-8
 Signatário Autorizado
 Documento assinado de forma digital



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br