

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANDRÉ FELIPE FERNANDES

**Influência do tratamento térmico do aço ferramenta AISI H13 no
acabamento superficial após usinagem**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

ANDRÉ FELIPE FERNANDES

**Influência do tratamento térmico do aço ferramenta AISI H13 no
acabamento superficial após usinagem**

Trabalho de conclusão de curso (TCC2) apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Andreato
Batista Mendes

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRÉ FELIPE FERNANDES

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO FERRAMENTA AISI H13 NO ACABAMENTO SUPERFICIAL APÓS USINAGEM

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 12 de fevereiro de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^o. Dr^o. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Mecânica)

Prof^o. Dr^o. Márcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me dar a oportunidade de poder realizar uma graduação, aos meus pais que fizeram todos os esforços e acreditado que este sonho seria possível, a Bianca pelas conversas em momentos difíceis e ao meu amigo Thadeu.

Gostaria de agradecer também a todos os amigos que adquiri por causa da universidade, pois sem os momentos de descontração e ajuda eu não estaria aqui. Eu agradeço a todos os professores, pois cada um tem uma parcela muito grande em meu crescimento profissional, agradeço ao meu orientador Marcio Andreato Batista Mendes por ter aceitado me auxiliar nesta etapa muito importante da minha vida e para o encerramento de um ciclo.

RESUMO

FERNANDES, A. F. **Influência do tratamento térmico do aço ferramenta AISI H13 no acabamento superficial após usinagem.** 2019. 54 f. Exame de trabalho de conclusão de curso (Engenharia de materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

O aço ferramenta AISI H13 encontra grande aplicação na fabricação de moldes para fundição e injeção de metais não ferrosos, como alumínio e magnésio. Para este processo de fabricação é fundamental que o molde feito com aço ferramenta possua elevada temperabilidade, apresentando elevada resistência ao amolecimento pelo calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade e boa usinabilidade. Além disso, é necessário que este aço especial apresente excelente resistência à choques térmicos devido aos aquecimentos e resfriamentos contínuos, fazendo com que o surgimento de trincas térmicas se reduzam, como também a resistência à fadiga térmica, à erosão e ao desgaste. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da influência dos tratamentos térmicos no acabamento superficial do aço AISI H13, após a usinagem. Para isso, primeiramente realizou os tratamentos térmicos de têmpera mais triplo revenido e o tratamento térmico de recozimento, em seguida nos corpos de prova foi realizado uma variação dos parâmetros do processo de torneamento, como a velocidade e profundidade de corte. Ademais, foi avaliada a rugosidade média dos valores absolutos em um rugosímetro na peça após a etapa de usinagem. Com a análise da rugosidade foi possível determinar que o tratamento térmico de têmpera e revenimento foi uma boa escolha, pois a peça que passou por este tratamento térmico e usinada com velocidade de corte de 95 m/min e profundidade de corte de 0,2 mm, possui um valor de rugosidade de 1,100 μm , muito próximo ao encontrado para os materiais submetidos ao tratamento térmico de recozimento que é o comumente utilizado pela indústria.

Palavras-chave: AISI H13. Torneamento. Acabamento superficial.

ABSTRACT

FERNANDES, A. F. **Influence of heat treatment of AISI H13 tool steel on surface finish after machining.** 2019. 54 f. Exame de trabalho de conclusão de curso (Engenharia de materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

The tool steel AISI H13 finds great application in the manufacture of molds for die casting of non-ferrous metals such as aluminum and magnesium. For this manufacturing process it is essential that the mold material presents high temperability, high resistance to heat softening, good wear resistance at high temperatures, excellent toughness, and good machinability. In addition, the alloy should also exhibit excellent resistance to thermal shocks due to the continuous cycles of heating and cooling, minimizing the nucleation of thermal cracks by increasing the thermal fatigue resistance together with the resistance to erosion and wear.. In this context, the present work has the objective of studying the influence of thermal treatments on the surface finish of AISI H13 steel after machining. In order to do this, it was first carried out the treatments of tempering of more triple tempered and the heat treatment of annealing, then in the specimens a variation of the parameters of the turning process was realized, as the speed and depth of cut.. In addition, the average roughness of the absolute values was analyzed in a rugosimeter in the part after the machining step. With the analysis of the roughness it was possible to determine that the heat treatment of tempering and tempering was a good choice, due to the part that went through this thermal treatment and with cutting parameters of cutting speed of 95 m/min and depth of cut of 0,2 mm, has a roughness value of 1,100 μm , very close to that found for the materials passed by the annealing heat treatment which is commonly used by the industry.

Keywords: AISI H13. Turning. Surface finish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático do processo ESR.....	19
Figura 2 - Ciclo de tratamento térmico recomendado para o aço AISI H13, temperado e revenido.....	20
Figura 3 - Rampa de aquecimento e resfriamento do aço AISI H13 para o tratamento térmico de recozimento	21
Figura 4 - Microestrutura do aço AISI H13, austenização 1040°C, têmpera realizada a óleo, revenido 560°C x 2hrs.	22
Figura 5 - Microestrutura do aço AISI H13 recozido.....	23
Figura 6 - Classificação dos processos de fabricação com remoção de cavaco.....	24
Figura 7 - Classificação dos processos de fabricação com remoção de cavaco.....	25
Figura 8 - Geometria da ferramenta de corte de carbeto de tungstênio.	25
Figura 9 - Demonstração de como é realizado a análise de rugosidade média (Ra).	28
Figura 10 - Atividades que serão realizadas no trabalho.....	29
Figura 11 - Tratamento térmico de têmpera e triplo revenimento realizado nas amostras do grupo A.....	31
Figura 12 – Cortadora metalográfica (Marca: Fortel/Modelo: CF III).	34
Figura 13 - Serra rápida portátil, sem refrigeração (marca: Makita/Modelo: Mt).....	34
Figura 14 - Forno para a realização dos tratamentos térmicos (Marca: Jung /Modelo: 1712).....	35
Figura 15 - Microscópio óptico para a realização das microestruturas (Marca: Zeiss/modelo:Scope A1).	36
Figura 16 – Durômetro (Marca: INSIZE /Modelo: ISH-RSR150).	36
Figura 17 – Torno universal (Marca: NARDINI/Modelo: NODUS 220-SE).	37
Figura 18 – Rugosímetro (Marca: Instrutherm/Modelo: RP-200).....	37
Figura 19 - Microscopia do Aço AISI H13 recozido como recebido, aumento de 1000x.	38
Figura 20 - Pontos da medida de dureza no material recozido, como recebido.	39
Figura 21 - Microestrutura do AISI H13 temperado e revenido, aumentada 1000x.	40
Figura 22 - Pontos da medida de dureza no material temperado e triplo revenido.	40
Figura 23 - Microscopia do aço AISI H13, recozido aumentada 1000x.	41
Figura 24 - Pontos da medida de dureza no material recozido.	42

Figura 25 - Corpo de provas e os cavacos gerados no torneamento.	43
Figura 26 - Corpo de provas e os cavacos gerados no torneamento (continuação).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação AISI dos aços ferramentas	17
Tabela 2 – Composição do aço AISI H13 em porcentagem de massa	18
Tabela 3 - Variáveis do processo de usinagem.	32
Tabela 4 – Configuração dos parâmetros de cada etapa do torneamento.	33
Tabela 5 - Dureza do aço AISI H13 como recebido.....	39
Tabela 6 - Dureza do aço AISI H13 temperado e revenido.....	40
Tabela 7 - Dureza do aço AISI H13 temperado e revenido.....	42
Tabela 8 - Valores das rugosidades dos corpos de prova após o torneamento.	45
Tabela 9 - Média e desvio padrão de rugosidade das amostras recozidas.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO GERAL	13
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1 AÇO	15
4.2 AÇO FERRAMENTA	16
4.2.1 Aplicação e características	16
4.3 APLICAÇÕES DO AISI H13	17
4.3.1 Aço ferramenta para trabalho à quente – AISI H13	18
4.3.2 Processo de fabricação do AISI H13	19
4.3.2.1 Tratamentos térmicos	20
4.4.1 Torneamento	24
4.4.2 Morfologia do cavaco	26
4.4.3 Rugosidade	26
5 METODOLOGIA	29
5.1 MÉTODOS	29
5.2 MATERIAIS INSTRUMENTAIS	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1 CORTE DOS CORPOS DE PROVA	38
6.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS	39
6.2.1 Têmpera	39
6.3 MORFOLOGIA DO CAVACO	42
6.4 RUGOSIDADE	44
7 CONCLUSÃO	48
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

Os aços ferramentas em geral são ligas Fe-C (ferro-carbono) com adição de elementos de liga formadores de carbonetos, como o vanádio, tungstênio, cromo, molibdênio e entre outros. Como o próprio nome sugere, tais aços são aplicados na fabricação de ferramentas de corte, dobramento, moldes, matrizes e qualquer outra ferramenta capaz de transformar um material em uma peça de uso bem definido.

Embora exista uma quantidade vasta de aços ferramentas, a indústria de ferramenta utiliza uma seleção destes materiais, somente utilizando os que apresentam propriedades e desempenhos consagrados ao longo do tempo, como por exemplo, o AISI H13, AISI D2 e AISI M2. Estes aços são sempre produzidos com rigorosos controles de qualidades de composição química e homogeneidade. Em quantidades pequenas e fabricados por forjamento, fundição de precisão ou metalurgia do pó.

Os aços que constituem a família H formam um grupo especial de aços de alta liga utilizados em moldes para a fabricação de metais em altas temperaturas, normalmente acima de 500°C. O aço AISI H13 apresenta características de elevada temperabilidade, elevada resistência ao amolecimento ao calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade, boa usinabilidade e entre outras, é utilizado como molde permanente para a fabricação de fundidos de metais não ferrosos, como o alumínio e magnésio.

O molde suporta grandes esforços provenientes do processo de fundição, necessitando de elevada dureza (42 a 55 HRC). Para aumentar a dureza destes materiais, os tratamentos térmicos são realizados de modo alterar e controlar a microestrutura do material de acordo com a necessidade.

Os moldes utilizados na fundição de metais não ferrosos necessitam passar pelo processo de usinagem, que implica na variação da rugosidade do material. Com o objetivo de alcançar uma alta qualidade de performance, busca-se uma menor rugosidade. Para isso, é possível variar os parâmetros de usinagem a fim de controlar o acabamento superficial por meio da análise da superfície do material usinado. A verificação da rugosidade é medida em um rugosímetro, ou num perfilômetro, que fornece a rugosidade média em valores absolutos (R_a).

O objetivo deste trabalho é avaliar se o tratamento térmico comumente aplicado no aço AISI H13, resulta em um melhor acabamento superficial após o

processo de usinagem final. Neste intuito, foi verificada a influência de três tipos de tratamentos térmicos no aço AISI H13, destinado à fabricação de moldes para uso em fundição e injeção de metais, mensurando a rugosidade obtida após a usinagem em quatro diferentes condições.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar de que forma o tratamento térmico praticado pela indústria no aço AISI H13, utilizado em moldes de fundição e injeção de metais não ferrosos influencia na rugosidade após o processo de usinagem

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para alcançar o objetivo do estudo, a análise do tratamento térmico comumente utilizado na indústria, o trabalho foi fragmentado em algumas etapas. São elas:

- Realização do tratamento térmico de recozimento e têmpera mais revenimento.
- Análise da microestrutura após a realização dos tratamentos térmicos por meio de metalografia e dureza.
- Avaliação do efeito do tratamento térmico no acabamento superficial da peça após o processo de usinagem, no qual variou-se os parâmetros de velocidade e profundidade de corte.

3 JUSTIFICATIVA

O estudo proposto para este trabalho é uma verificação da influência dos tratamentos térmicos mais aplicados no aço AISI H13 pela indústria, este por sua vez, é utilizado em moldes na fabricação de fundidos e injetados de metais não ferrosos. Estes moldes necessitam de uma baixa rugosidade oriunda do processo de usinagem, pois a superfície do molde é que fornece o acabamento superficial do material que foi fundido ou injetado nele. Além disso, após o processo de usinagem o molde passa por tratamentos térmicos, o que pode comprometer a rugosidade da superfície, necessitando de outros processos abrasivos subsequentes para melhorar o acabamento superficial, como lixamento e polimento. Para que as peças fabricadas tenham poucos ou nenhum tratamento superficial subsequente, uma boa saída é o estudo das variáveis do tratamento térmico de têmpera e revenimento no molde. Espera-se, então, que este estudo demonstre uma alternativa mais acessível e menos custosa para o problema das indústrias em submeterem as peças a acabamentos abrasivos, após a confecção pelo molde. Com menos processos na fabricação, acarretará em menos tempo de produção, o que, por sua vez, reduz o custo final da peça.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o desenvolvimento deste trabalho, esta seção possui todo o embasamento teórico para a sua realização. Os estudos da literatura abordada apontam sobre a composição do aço e suas características, aços ferramentas, aplicações, tratamentos térmicos, torneamento e rugosidade.

4.1 AÇO

O aço é liga de ferro carbono em que o teor de carbono varia de 0,08 a 2,11%, juntamente com outros elementos de liga que possui a função de melhorar as características físicas e mecânicas do material. O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência a tração, porém são mais dúcteis (PFEIL; PFEIL 2009; CHIAVERINI 1996).

Segundo Chiaverini (1996), os aços podem ser classificados em grupos baseados nas propriedades comuns desses materiais, ou seja, a) pela composição: aço carbono e aço liga; b) processo de acabamento: aços laminados a quente ou a frio; e c) pela forma do produto acabado barra, chapa grossa ou fina, tira, tubo ou perfil estrutural.

Para a classificação pela composição dos aços usa-se as normas da *American Society for Testing and Materials - ASTM* e da *Society of Automotive Engineers - SAE*, que implica que as últimas letras, exemplo XX ou XXX correspondem às cifras indicadoras dos teores de carbono, assim na designação AISI-SAE, a classe 1023 significa aço-carbono com 0,23% de carbono em média. Os vários tipos de aços são diferenciados pelos dois algarismos iniciais, pela presença ou somente de carbono como principal elemento de liga (além é claro, das impurezas normais de silício, manganês, fósforo e enxofre), ou outros elementos de liga, como níquel, cromo e dentre outros (além do carbono). Exemplificando, quando os dois primeiros algarismos são 1 e 0 (10), os aços são simplesmente ao carbono; quando são 1 e 1 (11), os aços são de usinagem fácil com alto enxofre; quando são 4 e 0 (40), os aços são de molibdênio, com 0,25% de molibdênio em média e assim por diante (CHIAVERINI, 1996).

No Brasil, os critérios adotados por órgãos internacionais como o *American Iron and Steel Institute - AISI* e *Society of Automotive Engineers – SAE*, também são adotados como parâmetros nacionais (CHIAVERINI, 1996).

4.2 AÇO FERRAMENTA

Os aços ferramentas em geral são ligas Fe-C com adição de elementos de liga formadores de carbonetos, como o vanádio, tungstênio, cromo, molibdênio e entre outros. Como o próprio nome sugere, tais aços são aplicados na fabricação de ferramentas de corte, dobramento, moldes, matrizes e qualquer outra ferramenta capaz de transformar um material em uma peça de uso bem definido (SOARES JUNIOR, 2006).

Embora exista uma quantidade de mais de 100 tipos de aços ferramentas, normalizados internacionalmente e desenvolvidos com a finalidade de suprir as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria de ferramentaria utiliza uma quantidade reduzida desses tipos de aços. Como por exemplo, pode-se citar o AISI H13, AISI D2 e AISI M2, os quais apresentam propriedades e desempenho consagrados ao longo do tempo. Nos últimos anos, o desenvolvimento dos aços ferramentas foi direcionado principalmente para a melhoria na produtividade dos processos e para o surgimento de novas vias de produção (GABARDO, 2008; SOARES JUNIOR, 2006).

4.2.1 Aplicação e características

Os aços ferramentas são de extrema importância tecnológica, pois eles visam atingir elevados padrões de qualidade para serem aplicados em operações que envolvam a modificação do formato de material tais como: corte, afiação e forjamento (GABARDO, 2008).

As principais características destes aços ferramentas são de apresentar elevada dureza e resistência à abrasão, normalmente aliados à boa tenacidade e manutenção das propriedades de resistência mecânica, também em elevadas temperaturas. Essas características normalmente se mantêm com adição de altos teores de carbono e ligas como tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo (GABARDO, 2008).

Os aços ferramentas são produzidos com rigorosos controles de qualidades de composição química e homogeneidade do material e, perante outros tipos de aços, são produzidos em pequenas quantidades geralmente por forjamento, via metalurgia do pó.

A classificação dos aços ferramentas é baseada na sua aplicabilidade ou nas características metalúrgicas. Na Tabela 1, é possível observar as principais variedades de aço ferramenta e os respectivos símbolos que representam família (COSTA E SILVA, DA; MEI, 2006).

Tabela 1 – Classificação AISI dos aços ferramentas

Tipo de aço ferramenta		Símbolo
	Aços temperáveis em água (Water)	W
	Aços resistentes ao choque (Shock)	S
Aços para fins especiais	Tipo baixa liga (Low alloy)	L
	Aços para moldes	P
	Aços temperáveis em óleo (Oil)	O
Aços para trabalho a frio	Aços média liga temperáveis ao ar (Air)	A
	Aços alto carbono, alto cromo	D
Aços para trabalho a quente (Hot working)	Ao cromo	H1 – H19
	Ao tungstênio	H20 – H39
	Ao molibdênio	H40 – H59
Aços rápidos	Ao Tungstênio	T
	Ao Molibdênio	M

Fonte: COSTA E SILVA, DA; MEI (2006).

Dentre esses tipos de aço ferramenta, será abordado na sequência o aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13, por ser o objeto de estudo do presente trabalho, demonstrando sua aplicabilidade, características estruturais e seu processo de fabricação.

4.3 APLICAÇÕES DO AISI H13

Os aços ferramentas da família H são amplamente utilizados para a confecção de matrizes moldes, ferramentas de conformação de chapas, corte a frio, componentes de máquina e etc. Abastecem também os segmentos de autopeças,

automobilístico, eletroeletrônico e matrizes para extrusão de alumínio (BACALHAU; RODRIGUES; MESQUITA, 2014; VALES, 2010).

4.3.1 Aço ferramenta para trabalho à quente – AISI H13

Os aços que constituem a família H formam um grupo especial de aços de alta liga, destinado à fabricação de metais em altas temperaturas, normalmente acima de 500°C. O aço AISI H13 é um aço ultra resistente, com 5% de cromo em sua composição (METAL HANDBOOK, 1993).

De acordo com a METAL HANDBOOK (1993), a composição química do AISI H13 em porcentagem de massa está descrita da Tabela 2:

Tabela 2 – Composição do aço AISI H13 em porcentagem de massa

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	0,32 - 0,45	0,20 – 0,50	0,80 – 1,20	4,75 – 5,50	1,10 – 1,75	0,80 – 1,20

Fonte: METAL HANDBOOK (1993).

A dureza do H13 varia em torno de 42 a 55 HRC (Rockwell C). Esses aços possuem cromo, molibdênio ou tungstênio como elemento de liga principal, além de tungstênio e vanádio, que são formadores de carbonetos de maior dureza e estabilidade térmica, apresentando boa resistência ao amolecimento pelo calor (VALES, 2010).

Segundo VALES (2010), o alto teor de tungstênio e molibdênio aumenta a resistência a quente, mas reduz ligeiramente a tenacidade. Já a sua resistência ao desgaste erosivo em altas temperaturas é aumentada pela a adição do vanádio. As principais características do AISI H13 são:

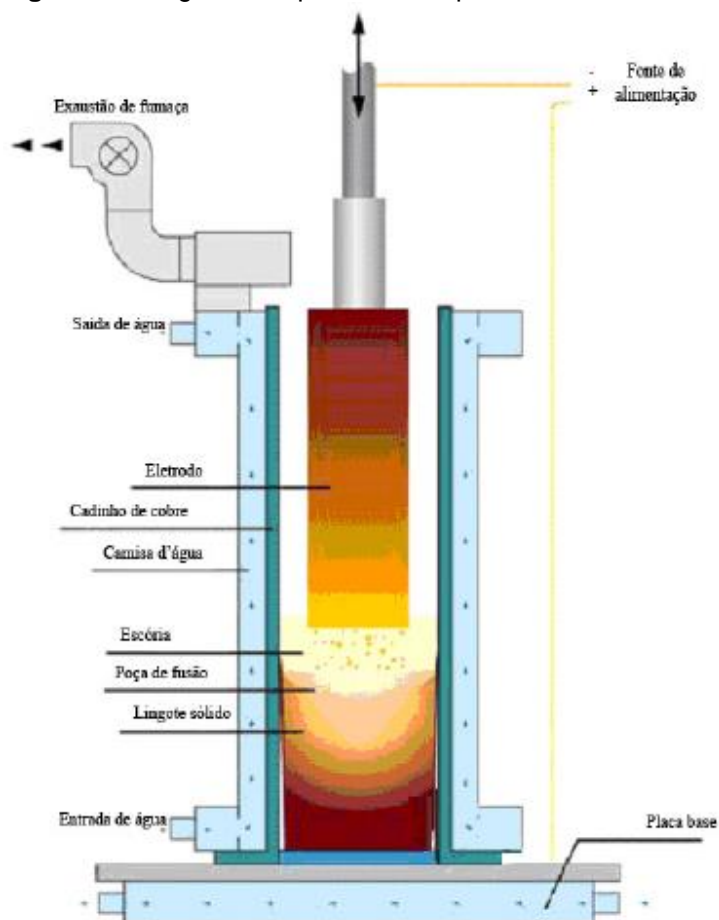
- Elevada temperabilidade;
- Resistência à deformação na temperatura de uso;
- Resistência ao impacto;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência à deformação no tratamento térmico;
- Usinabilidade.

4.3.2 Processo de fabricação do AISI H13

O processo de fabricação do AISI H13 é a refusão por eletroescória-ESR (*Electroslag Remelting*) e eventualmente é utilizado o V.A.R. (*vacuum arc remelting*). Esse método tem como base na produção de lingotes de alta qualidade pelo processo VD (desgaseificação a vácuo) (KELKAR *et al.*, 2013).

O processo ESR utiliza um cadinho refrigerado a água, contendo a escória e o lingote. O lingote é construído por meio do aquecimento resistivo criado por uma passagem de corrente alternada, entre o eletrodo e o cadinho, derretendo-o em um banho de escória, que foi superaquecido até que comece o gotejamento do metal fundido. Estas gotas atravessam a escória, refinando o metal líquido até o fundo do molde, onde se solidificam. Este processo permite obter uma solidificação mais controlada, tendo uma melhor integridade estrutural do material, resultando em um aço homogêneo e isotrópico (GABARDO, 2008; KELKAR *et al.*, 2013). Na Figura 1, é exemplificado o diagrama do processo de fabricação ESR.

Figura 1 – Diagrama esquemático do processo ESR.



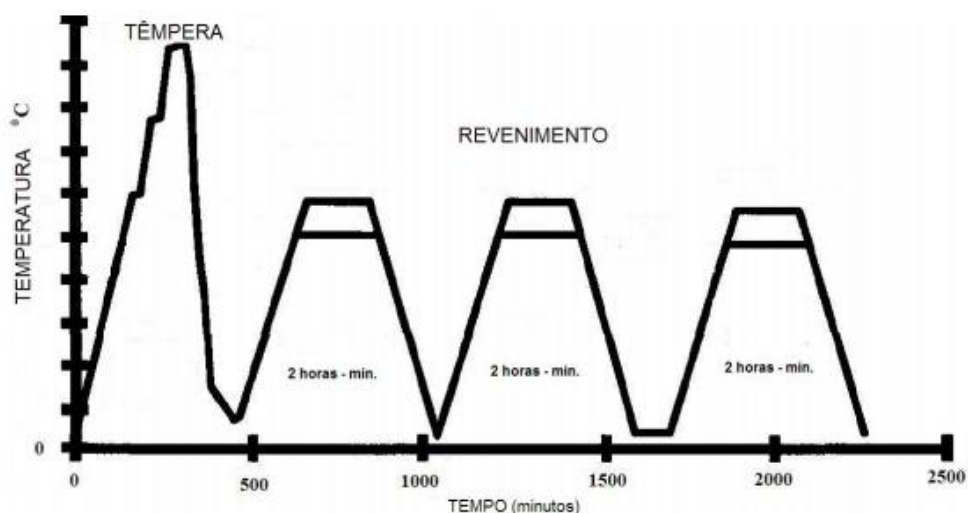
Fonte: Adaptado de KELKAR; PATANKAR; MITCHELL, 2003.

4.3.2.1 Tratamentos térmicos

Os principais tratamentos térmicos realizados para o aço H13, segundo METAL HANDBOOK (1993) são:

- Têmpera: aquecimento uniforme até a temperatura de 815°C. Posteriormente ocorre o processo de temperatura de austenização, entre 995°C a 1025°C, por um tempo de 20 minutos, e mais 5 minutos para cada 25 mm de espessura. Resfriamento rápido, em água ou óleo, mas recomenda-se o óleo;
- Revenimento: esse processo é realizado após a têmpera com o objetivo de ocorrer a transformação da microestrutura, obtendo uma dureza próxima a da martensita. Entretanto, apresenta uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente melhoradas. O material é aquecido a uma temperatura de 540°C, a uma taxa de 10°C/min, permanecendo por 2 horas, por resfriamento ao ar. É recomendado que o ciclo de tratamento seja realizado por triplo revenimento, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Ciclo de tratamento térmico recomendado para o aço AISI H13, temperado e revenido.

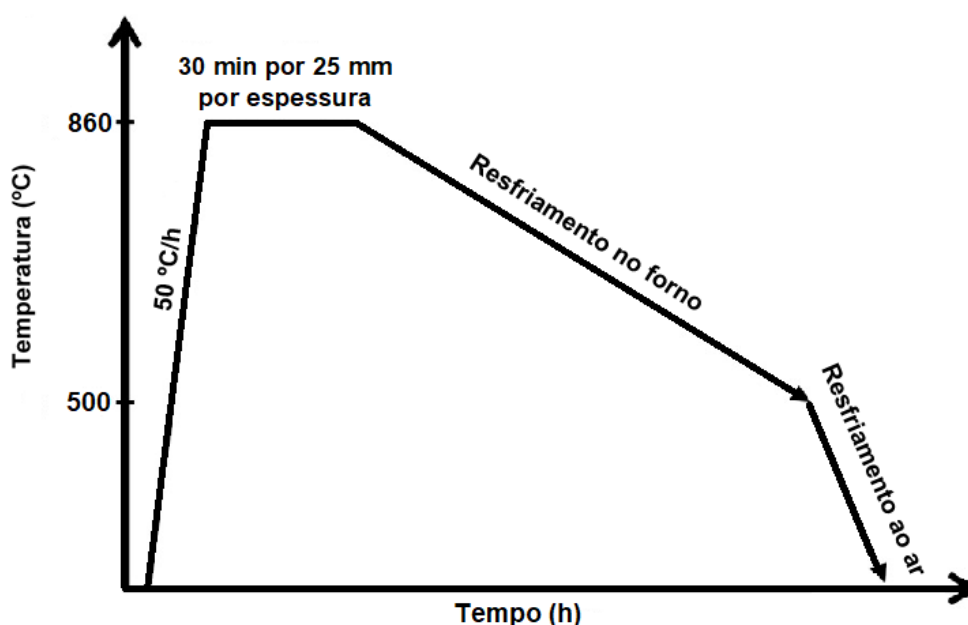


Fonte: VALES, 2010.

O tratamento térmico de recozimento está entre os principais do aço AISI H13, este é o tratamento mais utilizado industrialmente. Para a etapa de recozimento

foi utilizado a metodologia estudada por KANG *et al.*(2014), portanto foi feito um aquecimento lento a uma taxa de 50°C/h, até atingir a temperatura de 860°C, permanecendo por 30 minutos a cada 25 mm de espessura. O resfriamento foi realizado em duas etapas, a primeira dentro do forno até atingir a temperatura de 500°C, a uma taxa de aproximadamente 30°C/h e a segunda etapa realizada ao ar. Na Figura 3, tem-se demonstrado a rampa de aquecimento e resfriamento do tratamento térmico de recozimento para o aço AISI H13.

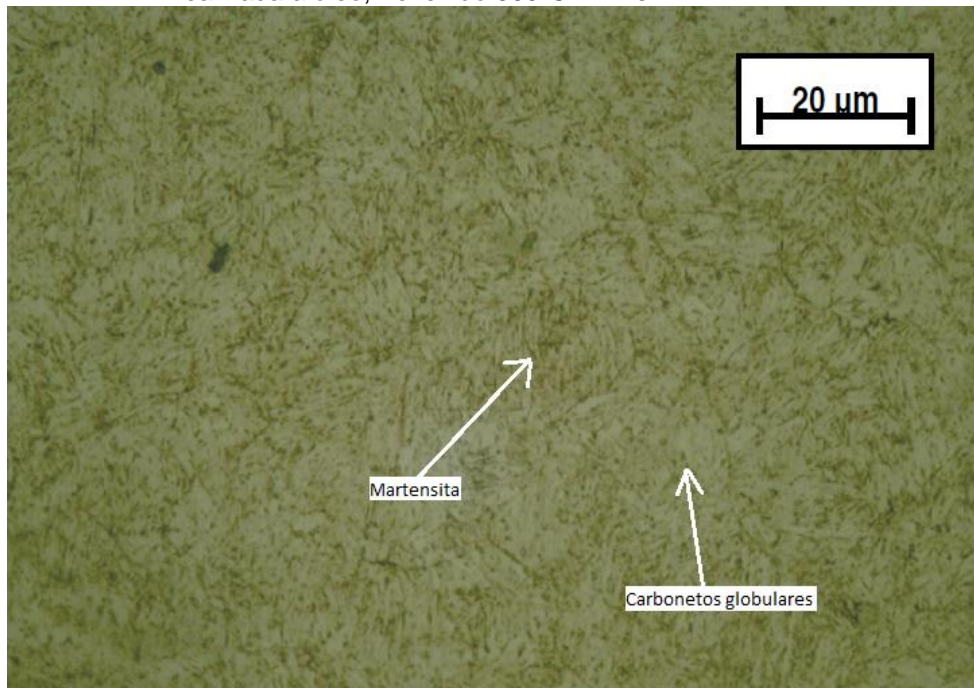
Figura 3 - Rampa de aquecimento e resfriamento do aço AISI H13 para o tratamento térmico de recozimento



Fonte: Adaptado de KANG *et al.*, 2015.

O aço AISI H13 tratado termicamente por têmpera seguida de revenimento possui como microconstituintes: martensita, e carbonetos globulares, como pode ser verificado pela Figura 4. A microestrutura da martensítica revenida consiste em partículas de carbonetos globulares (partículas circulares da cor preta) extremamente pequenas e uniformemente dispersas, em uma matriz ferrítica (VALES, 2010).

Figura 4 - Microestrutura do aço AISI H13, austenização 1040°C, têmpera realizada a óleo, revenido 560°C x 2hrs.

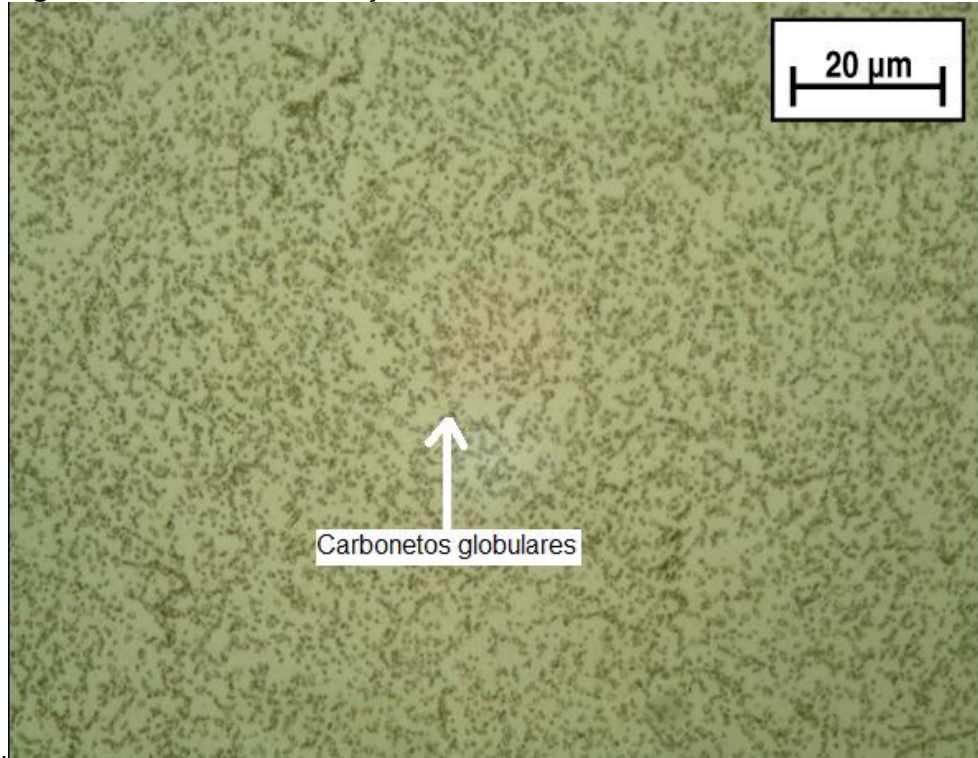


Fonte: GABARDO, 2008.

Após a têmpera o aço AISI H13 necessita de dois revenimentos, onde no primeiro, há precipitação de carboneto secundários; no segundo, ocorre a transformação da martensita que transformou no primeiro revenido em martensita revenida; um terceiro revenido é realizado para se obter uma maior ductilidade e tenacidade no material (VALES, 2010).

Quando o material é submetido ao tratamento térmico de recozimento após conformação plástica, é possível observar a presença de carbonetos globulares (partículas esféricas na cor preta) distribuídos na matriz ferrítica (região branca), Figura 5 (MOROZO, 2013).

Figura 5 - Microestrutura do aço AISI H13 recozido.



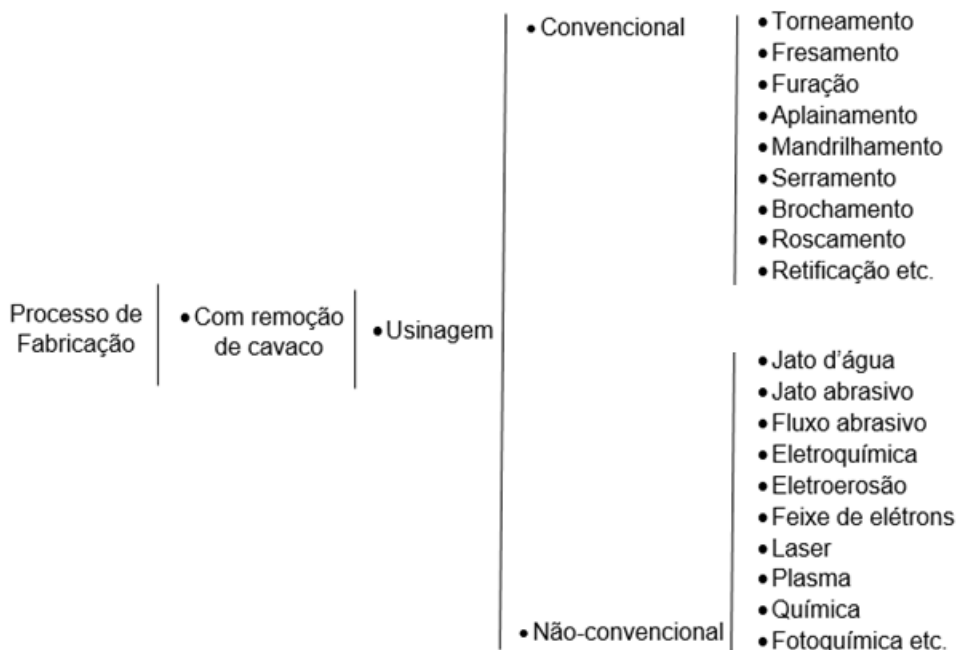
Fonte: Imagem adaptada de GABARDO, 2008.

4.4 USINAGEM

Tendo em vista o processo de fabricação das matrizes para moldes de metais não ferrosos, após a etapa de recozimento ocorre o processo de usinagem. Esta etapa confere a forma final da matriz por meio da remoção de cavaco, utilizando-se para isso uma ferramenta de corte. Esse cavaco, que é a porção de material retirada pela ferramenta de corte, é caracterizado por apresentar forma geométrica irregular e que se correlaciona com o acabamento superficial no material usinado.

Esta etapa de usinagem é um processo bastante complexo, devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. Mas ao se determinar essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível. Na Figura 6, é mostrada a classificação dos processos de fabricação com remoção de cavaco (MACHADO *et al.*, 2009).

Figura 6 - Classificação dos processos de fabricação com remoção de cavaco.



Fonte: Adaptado de MACHADO et al., 2009.

De acordo com MACHADO *et al.* (2009), para a obtenção da superfície desejada é necessário que se providencie um movimento relativo apropriado entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte. Assim sendo, para que aconteça uma boa usinagem, são necessárias as definições das grandezas físicas no processo de corte: o movimento, que são relativos entre a peça e a aresta cortante; as direções, que estão relacionados aos movimentos que causam diretamente a retirada de cavaco; percursos da ferramenta na peça, que caminha em relação ao ponto de referência de acordo com a velocidade.

Dentre os processos ilustrados na Figura 6, os mais significativos para a fabricação de uma matriz de molde de metais não ferrosos são os processos de fresamento, torneamento e retificação. Assim, na sequência será dado ênfase ao processo de torneamento, processo que foi utilizado na execução da proposta do presente projeto.

4.4.1 Torneamento

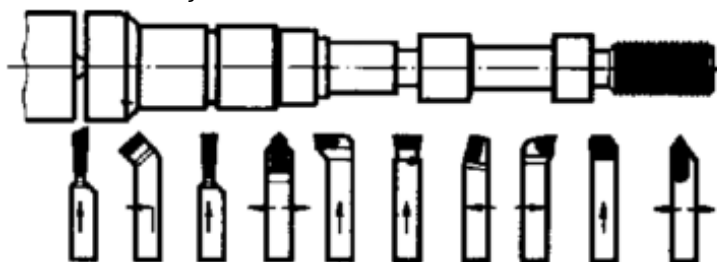
O torneamento é uma operação de usinagem de peças cilíndricas rotacionais em torno de um eixo fixo, este processo gera um cavaco. O cavaco removido por

uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter uma dureza superior à do material a ser cortado (MONTEIRO, 1999).

Para se executar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta: a) movimento de corte (designado de V_c); b) movimento de avanço (designado por f); e c) movimento de penetração (designado por a_p). O primeiro, considerado o movimento principal, é o movimento rotativo realizado pela peça; o segundo, desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça; o terceiro, permite determinar a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regular a profundidade, respectivamente (MONTEIRO, 1999).

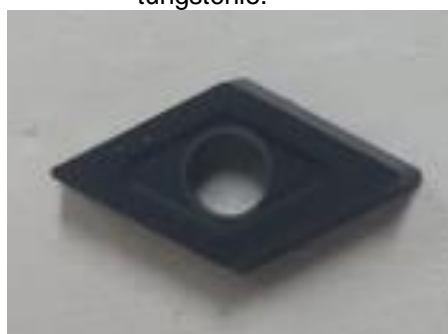
Existem várias geometrias de ferramenta de corte, sendo que cada uma tem distintas finalidades, conforme pode ser visto na Figura 7. Já na Figura 8, é mostrado a ferramenta de corte para torner superfícies cilíndricas externas e que foi utilizado para a realização deste trabalho. Diferentemente das ferramentas ilustradas na Figura 7, essa é uma ferramenta de corte com geometria diferente, por se tratar de uma ferramenta sinterizada e que precisa ser fixada mecanicamente no porta ferramenta.

Figura 7 - Classificação dos processos de fabricação com remoção de cavaco



Fonte: MONTEIRO, 1999.

Figura 8 - Geometria da ferramenta de corte de carbeto de tungstênio.



Fonte: Autoria própria

Após o processo de usinagem de tais matrizes é realizado a análise da rugosidade deixada pela usinagem, que permite a observação das possíveis deformações plásticas e elásticas no material. Esta análise é feita pelo rugosímetro por meio da medição das irregularidades em sua superfície feitas pelos processos de usinagem.

4.4.2 Morfologia do cavaco

No torneamento de peças, assim como na maioria dos casos de usinagem, a maior parte do calor gerado é dissipado através do cavaco, principalmente a altas velocidades, de modo que a temperatura da ferramenta e da peça diminui substancialmente. Durante o corte contínuo, o cavaco tem o aspecto alaranjado, dourado ou azulado. Essa característica, dependendo da temperatura que o corpo de prova atinge e escoa como uma fita, a sua cor muda conforme aumenta a temperatura do processo, sendo o alaranjado de menor temperatura e o azulado de maior temperatura (BONFÁ, 2013).

4.4.3 Rugosidade

A rugosidade é definida como um conjunto de irregularidade, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam a superfície. Essa superfície irregular pode ser classificada em dois grandes grupos: a) erros macro geométricos que são os erros de forma, que podem ser verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil e dentre outros; e b) erros micro geométricos, que são os erros conhecidos como rugosidade (DOTTO *et al.*, 2004).

Os parâmetros da rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente, podendo ser analisados por rugosímetro e perfilômetro em diversas condições. O parâmetro mais importante é a rugosidade média dos valores absoluto, que será discutida na sequência no próximo tópico (ALVES, 2011; DOTTO *et al.*, 2004).

Um exemplo de análise da rugosidade para estudo da influência do acabamento superficial de aços ferramentas usinadas no processo produtivo visando eliminação de etapas de fabricação pode ser verificado no trabalho realizado por BOING, BECKERT e SCHMIDT (2010). Neste trabalho foi possível observar a

influência do tratamento térmico no aço-ferramenta AISI H13 em operação de fresamento com ferramenta de metal duro. Com base nos estudos realizados pelos autores mencionados, a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento e recozimento, as amostras são submetidas a técnica de usinagem, variando a velocidade de avanço e profundidade da ferramenta de corte. Em seguida o cavaco gerado foi observado por um microscópico para a análise da sua morfologia e também foi realizada a medida da rugosidade. Os materiais recozidos apresentam um cavaco contínuo, onde não identifica nenhuma evidência de fratura ou trinca, sendo possível observar uma taxa elevada de deformação em todo o corpo do cavaco. Para o temperado e revenido obteve-se um cavaco mais segmentado, apresentando uma baixa taxa de deformação em todo corpo do cavaco (BOING; BECKERT; SCHMIDT, 2010).

4.4.3.1 Rugosidade média dos valores absolutos (R_a)

Segundo ALVES (2011), a rugosidade média R_a (*Roughness Average*) é o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade da linha média dentro do comprimento de medição, de acordo com a Equação 1, ilustrado na Figura 9. Os parâmetros R_a podem ser usados nos seguintes casos: quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção e em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, dentre outros).

Equação 1 – Rugosidade média dos valores absolutos.

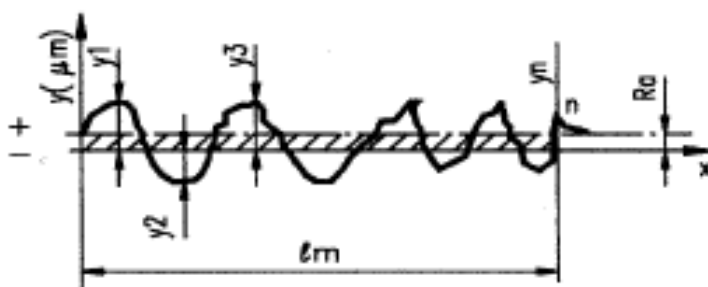
$$R_a = \frac{1}{lm} \int_0^1 y(x) dx \quad (1)$$

Onde:

lm = Comprimento de medição.

$y(x)$ = São os desvios do perfil de rugosidade.

Figura 9 - Demonstração de como é realizado a análise de rugosidade média (R_a).



Fonte: ALVES, 2011.

O parâmetro R_a é o mais utilizado atualmente, aplicado à maioria dos processos de fabricação, pois a rugosidade de uma peça manufaturada é afetada por diversos fatores, desde o processo de usinagem até a geometria da ferramenta de corte. (ALVES, 2011; DOTTO *et al.*, 2004; MARCHIORI, 2013).

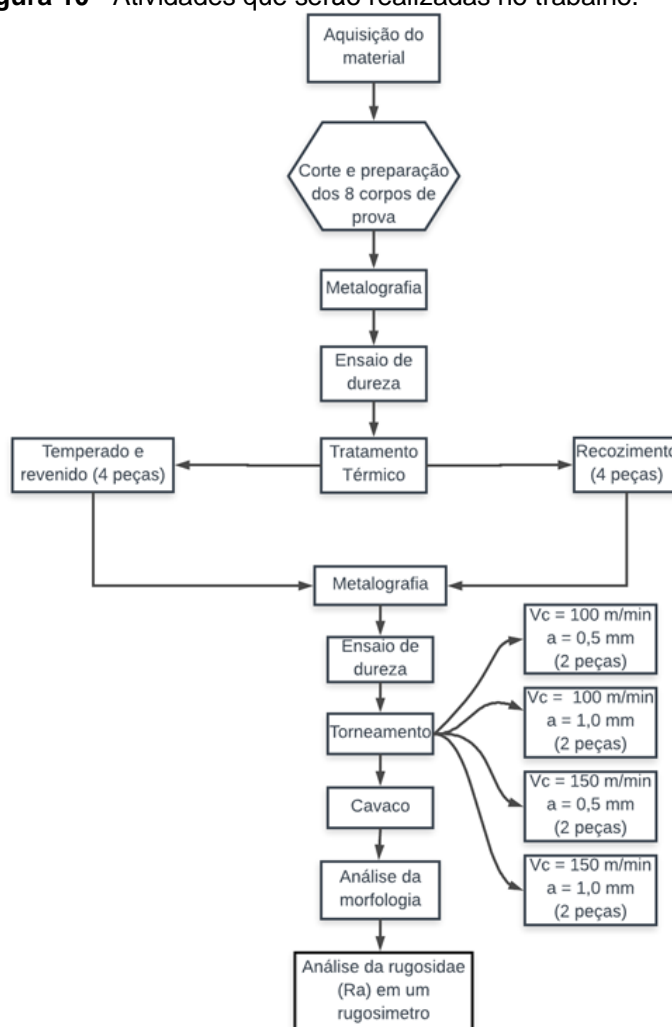
5 METODOLOGIA

Tendo em conta o caso específico deste trabalho, serão analisados nesta seção todas as soluções adotadas, isto é, todos os procedimentos e considerações para cumprir com o objetivo. Para facilitar o desenvolvimento e entendimento do trabalho, a metodologia foi dividida em duas partes, que serão discutidas nas subseções a seguir.

5.1 MÉTODOS

A primeira parte da metodologia é a definição das atividades a serem executadas nos laboratórios, tratamentos térmicos e medições. Na Figura 10, tem-se o fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização deste estudo.

Figura 10 - Atividades que serão realizadas no trabalho.

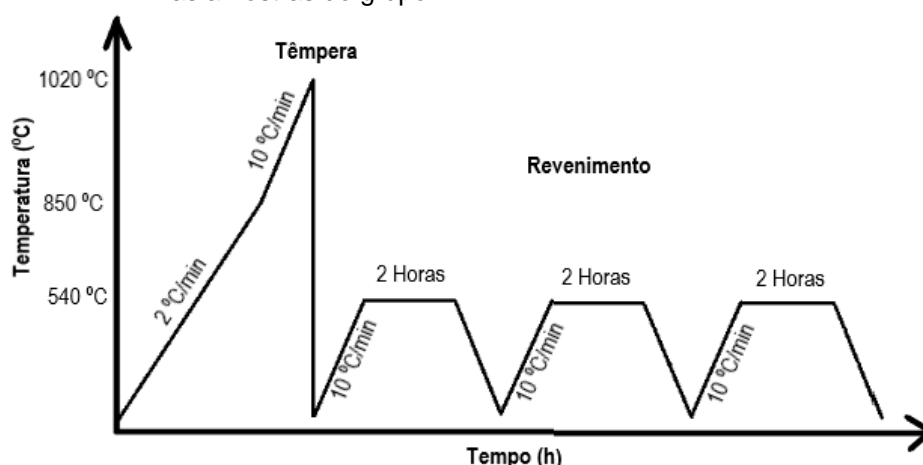


Fonte: Autoria própria.

A ordem da composição de cada bloco do fluxograma determina como foram efetuadas as atividades, ou seja, sequencialmente. Os tópicos a seguir definem as características de cada bloco:

- **Aquisição de material:** compra da barra circular de 1000 mm de comprimento e 25,4 mm (1 pol.) de diâmetro (AISI H13) foi comprada direto da empresa distribuidora localizada em São Paulo.
- **Corte e preparação:** Para o corte foi utilizada uma serra circular (marca: Makita, modelo: Mt). Obteve-se os 8 corpos de prova, com dimensões de 100 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro (para realização dos ensaios de torneamento e metalografia). Após o corte, todo o material foi lixado com lixa seca de granulometria 80 para remover possíveis rebarbas. Destas, algumas amostras foram destinadas à metalografia pra verificação das estruturas;
- **Tratamento térmico:** 4 corpos de provas foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera e revenimento (grupo A), e 4 corpos de prova pelo tratamento térmico de recozimento (grupo B);
 - **Têmpera e revenimento (grupo A):** As amostras foram aquecidas lentamente em um forno (marca: Jung, modelo: 1712) até a temperatura 850°C a uma taxa de 2°C/min, sendo que o aquecimento foi continuado até 1020°C a uma taxa de 10°C/min, permanecendo a peça por 25 minutos. Em seguida, foi resfriado rapidamente em óleo (Têmpera). Após o processo de têmpera foi realizado triplo revenimento, que consiste em aquecer a peça até 540°C, a uma taxa de 10°C/min, e permanecendo a peça por 2 horas dentro do forno e resfriamento ao ar, conforme esquema da Figura 11.

Figura 11 - Tratamento térmico de têmpera e triplo revenimento realizado nas amostras do grupo A.



Fonte: Autoria própria

- **Recozimento (grupo B):** As amostras foram aquecidas lentamente a uma taxa de 50°C/h até atingir a temperatura de 860°C, onde permaneceram por 30 minutos a cada 25 mm de espessura. O resfriamento foi realizado em duas etapas, a primeira dentro do forno até atingir a temperatura de 500°C, e a segunda etapa foi realizada ao ar;
- **Metalografia:** realizado com lixas de granulometria de 80, 240, 400, 600 e 1200 para obter uma superfície adequada, e polimento com alumina 1 μm e em seguida efetuou o ataque químico com nital 3%, posteriormente, levando ao microscópio óptico (marca: Zeiss, modelo: Scope A1), para a observação da microestrutura dos materiais;
- **Dureza:** foi medida em um equipamento de dureza Rockwell (marca: INSIZE, modelo: ISH-RSR150) para analisar a dureza do material, onde se realizou 5 medidas e tirou sua média;
- **Torneamento:** realizado no torno universal do departamento de mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A ferramenta de corte utilizada foi da marca LAMINA TECHNOLOGIES, modelo DCMT 070204 NN, recomendada para aço, aço inoxidável, ferro fundido, ligas de alumínio e ligas de níquel. As variáveis do processo de usinagem são demonstradas na Tabela 3. As variáveis informadas foram escolhidas de acordo com as informações do fabricante da ferramenta de corte. No manual da ferramenta de corte é

indicado os limites dos parâmetros recomendados para distintos tipos de materiais. Assim sendo, para o material Aço AISI H13 com dureza de 12 HRC, a recomendação é aplicar uma velocidade de 70 m/min a 130 m/min. Portanto, para se ter uma análise comparativa, escolheu-se valores próximos ao mínimo e máximo permitido, desde que estes mesmos extremos fiquem dentro da gama do limite do torno. Neste caso, o limite mínimo de velocidade de corte do torno para peças com 1 pol. de diâmetro é de 95 m/min e o máximo é de 121 m/min. Consequentemente, ao usar a velocidade mínima de corte de 95 m/min e a velocidade máxima de 121 m/min, atende simultaneamente a todos os requisitos proposto pelo estudo. Os valores de profundidades de corte foram baseados nos limites da ferramenta de corte e para ter resultados que possam comparar a rugosidade em duas diferentes profundidades. O processo de usinagem foi executado sem lubrificação;

Tabela 3 - Variáveis do processo de usinagem.

Variáveis do processo	
Velocidade da castanha ($V_{\text{cast } 1}$)	1180 min^{-1}
Velocidade da castanha ($V_{\text{cast } 2}$)	1500 min^{-1}
Velocidade de corte (V_{c1})	95 m/min
Velocidade de corte (V_{c2})	121 m/min
Velocidade do avanço (V_a)	0,4 mm
Profundidade (a_1)	0,1 mm
Profundidade (a_2)	0,2 mm
Comprimento do avanço	65 mm

Fonte: Autoria própria

Em suma, o processo de usinagem foi configurado de acordo com cada amostra, assim como apontado na Tabela 4.

Tabela 4 – Configuração dos parâmetros de cada etapa do torneamento.

Torneamento		
Etapas	Tratamentos térmicos	Parâmetros do processo
1	Temperado e revenido	$V_c = 95 \text{ m/min}$
	Recozido	$a = 0,1 \text{ mm}$
2	Temperado e revenido	$V_c = 95 \text{ m/min}$
	Recozido	$a = 0,2 \text{ mm}$
3	Temperado e revenido	$V_c = 121 \text{ m/min}$
	Recozido	$a = 0,1 \text{ mm}$
4	Temperado e revenido	$V_c = 121 \text{ m/min}$
	Recozido	$a = 0,2 \text{ mm}$

Fonte: Autoria própria

- **Análise da rugosidade:** foi medido em um rugosímetro da marca Marca: Instrutherm/Modelo: RP-200, que forneceu a rugosidade média dos valores absolutos (R_a).

5.2 MATERIAIS INSTRUMENTAIS

A segunda etapa da metodologia é identificar os equipamentos que foram utilizados para a realização do estudo proposto e medições, juntamente com um breve resumo dos mesmos segundo os próprios fabricantes.

De acordo com a primeira atividade, utilizou-se inicialmente a cortadora metalográfica de bancada robusta e versátil para corte. O corte é acionado por uma alavanca lateral que desloca o conjunto do motor/disco de encontro à peça fixada na morsa. O equipamento possui botões independentes para bomba de refrigeração e para o acionamento do motor. Na Figura 12, tem-se a disposição deste equipamento no laboratório (FORTEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2018).

Figura 12 – Cortadora metalográfica (Marca: Fortel/Modelo: CF III).



Fonte: Autoria própria

Como o resultado obtido pela cortadora metalográfica não foi satisfatória, devido ao disco de corte disponível nela não ser indicada para materiais ferrosos, confeccionou-se os corpos de prova numa serra rápida portátil. Essa serra possui uma maior potência, segundo a fabricante Makita (2018) é indicada para cortes em perfis, tubos, vergalhões e barras. Este equipamento pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Serra rápida portátil, sem refrigeração (marca: Makita/Modelo: Mt)



Fonte: Autoria própria

Com os corpos de prova definidos, a atividade seguinte é a de tratamento térmico. Nesta etapa, foi empregado o forno mufla (Figura 14), que, segundo o

fabricante Jung (2018), são fornos com temperaturas de até 1400°C, onde possuem uma ótima distribuição do calor, garantindo uma temperatura homogênea dentro do equipamento.

Figura 14 - Forno para a realização dos tratamentos térmicos (Marca: Jung /Modelo: 1712).



Fonte: Autoria própria

Após os tratamentos térmicos, observou-se a microestrutura dos corpos de prova (grupo A e B) por meio do microscópio óptico do fabricante Zeiss, onde segundo o fabricante (Zeiss, 2018), tem uma excelente usabilidade e recursos avançados de automação, possui componentes codificados e gerenciamento avançado de luz, oferecendo resultados confiáveis e reproduzíveis. Na Figura 15 tem-se a disposição deste equipamento no laboratório.

Figura 15 - Microscópio óptico para a realização das microestruturas (Marca: Zeiss/modelo: Scope A1).



Fonte: Autoria própria

Para aferir se o tratamento térmico foi realizado de forma correta, juntamente com a microestrutura se realiza o ensaio de dureza. O ensaio foi realizado no durômetro, que de acordo com o fabricante Insize (2018), é um equipamento que possui uma alta leitura e alta confiabilidade, o aparelho utilizado está demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Durômetro (Marca: INSIZE /Modelo: ISH-RSR150).



Fonte: Autoria própria

Após a verificação da dureza, os corpos de prova (grupo A e B) com comprimentos de 100 mm foram submetidos a etapa de usinagem, e para isto utilizou-se o equipamento da Figura 17.

Figura 17 – Torno universal (Marca: NARDINI/Modelo: NODUS 220-SE).



Fonte: Autoria própria

Para se medir a rugosidade dos corpos de prova, após a etapa de usinagem utilizou-se o equipamento da Figura 18, que de acordo com o fabricante Instrutherm (2018) ao medir a rugosidade de uma superfície, o captador é colocado na superfície da peça e traçado em proporção constante. O captador obtém a rugosidade da superfície pela agulha. A rugosidade causa um deslocamento do captador que resulta em mudanças no valor indutivo das bobinas, gerando um sinal analógico proporcional à rugosidade da superfície na saída do retificador e o resultado da medição pode ser lido no Display LCD.

Figura 18 – Rugosímetro (Marca: Instrutherm/Modelo: RP-200).



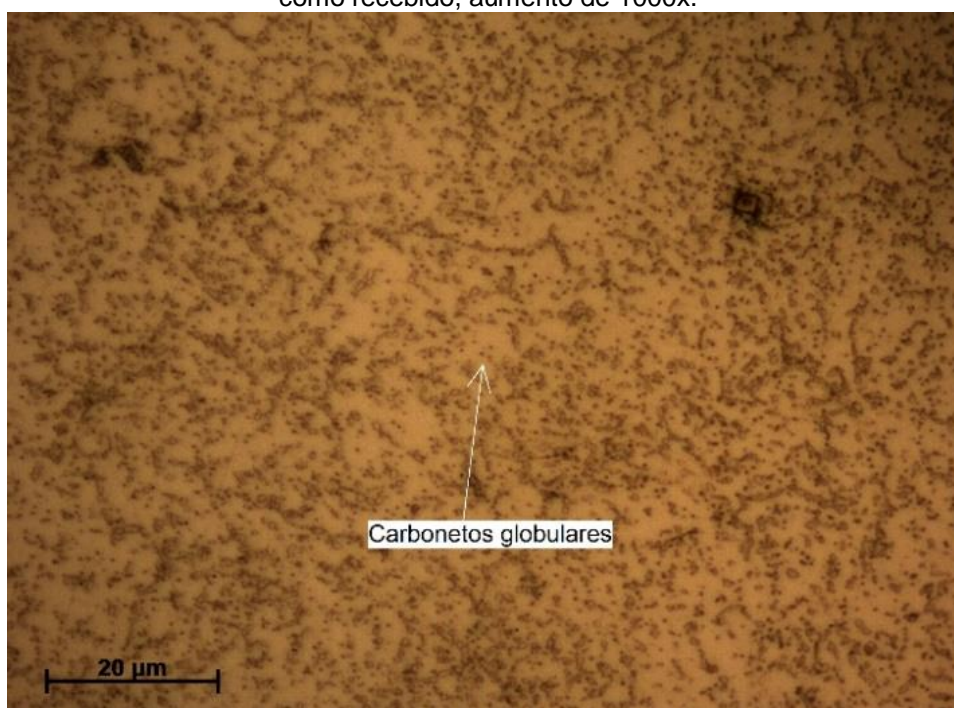
Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Para atestar se o material recebido se trata do AISI H13, num dos corpos de prova foi realizado a metalografia. Na Figura 19, é observado a microestrutura aumentada 1000x, onde comparando com a Figura 5, constata-se a presença dos mesmos elementos, que são os carbonetos globulares distribuídos na matriz ferrítica.

Figura 19 - Microscopia do Aço AISI H13 recozido como recebido, aumento de 1000x.



Fonte: Autoria própria

Os resultados de dureza obtidos na amostra como recebida estão dispostos na Tabela 5. Essa análise foi feita por meio da média de cinco ensaios em regiões distintas do corpo.

Tabela 5 - Dureza do aço AISI H13 como recebido.

Amostras	Dureza (HRC)
1	9,5
2	9,6
3	11,2
4	12,5
5	12,4
Média	11,0
Desvio padrão	1,3

Fonte: Autoria própria**Figura 20** - Pontos da medida de dureza no material recozido, como recebido.**Fonte:** Autoria própria

Na Figura 20, são indicadas as diferentes regiões de medições, isto se deve ao fato de garantir a uniformidade do material recebido. Com base na média aritmética destes dados e o seu desvio padrão que foi de 1,3 HRC, é possível comparar com a fornecida pelo fabricante, que foi de 12 HRC. Como a diferença entre a medida fornecida pelo fabricante e a média feita pelos resultados laboratoriais é de 1 HRC, torna-se uma margem de erro aceitável. Então, pode-se concluir que o material recebido se trata do aço AISI H13 recozido e que foi fornecido de forma correta.

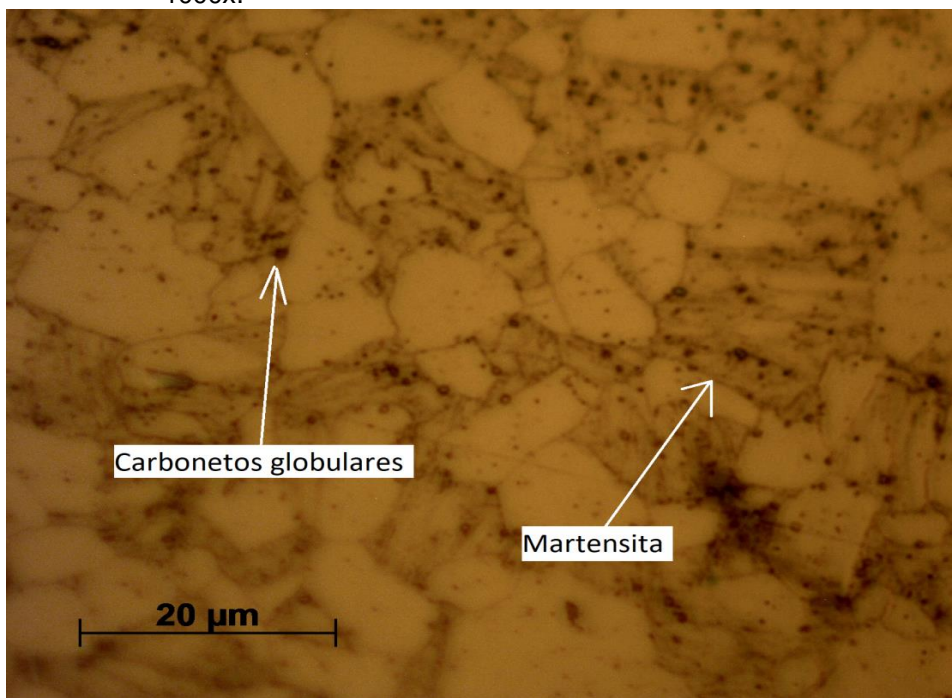
6.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

6.2.1 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera foi realizado nos corpos de prova do grupo A. Posteriormente foi efetuado o triplo revenimento para alívio de tensões e ter um ganho em sua ductilidade e tenacidade.

Uma das amostras foi analisada quanto à sua microestrutura. O resultado desta análise de imagem pode ser visto na Figura 21, onde observa-se a presença de todos os constituintes que compõem o aço AISI H13 temperado e revenido, tendo uma estrutura refinada com martensita e carbonetos globulares, estando de acordo com o encontrado na literatura citada (Figura 4).

Figura 21 - Microestrutura do AISI H13 temperado e revenido, aumentada 1000x.



Fonte: Autoria própria

Os resultados de dureza obtidos na amostra temperada estão dispostos na Tabela 6. Essa análise foi feita por meio da média de cinco ensaios em regiões distintas do corpo. As medições de dureza obtidos com o equipamento estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Dureza do aço AISI H13 temperado e revenido.

Amostras	Dureza (HRC)
1	41,6
2	44,6
3	44,9
4	42,2
5	42,7
Média	43,2
Desvio padrão	1,3

Fonte: Autoria própria

Figura 22 - Pontos da medida de dureza no material temperado e triplo revenido.



Fonte: Autoria própria

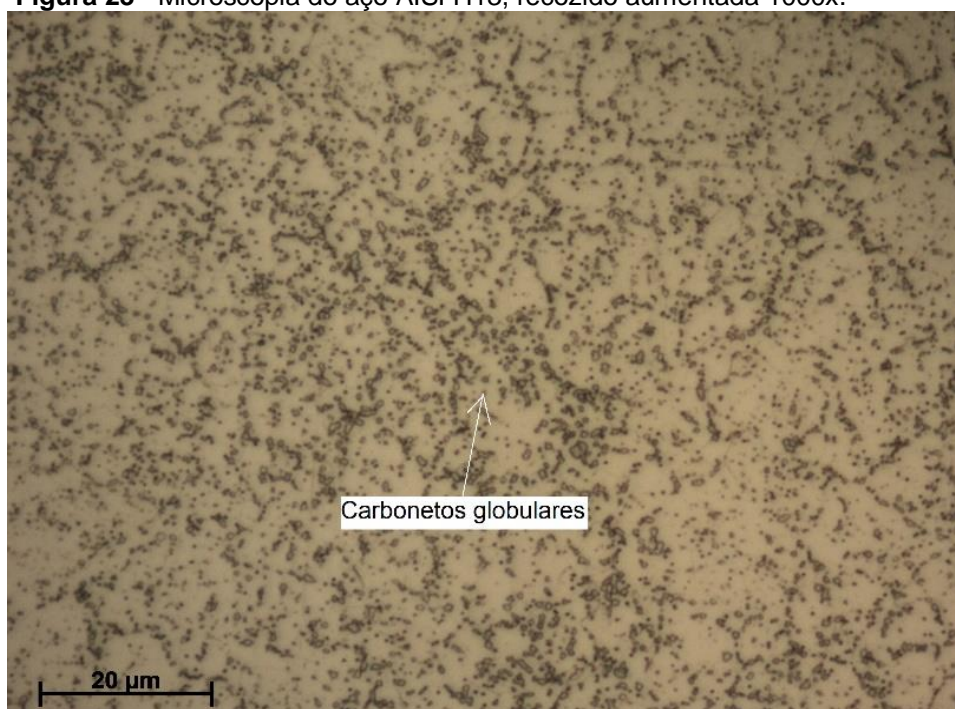
Na Figura 22, são indicadas as diferentes regiões de medições, isto ocorre para garantir a uniformidade do material tratado termicamente por têmpera e revenimento. Com base na média aritmética da Tabela 6 ($43,2 \pm 1,3$ HRC), é

possível comparar com a faixa de dureza fornecida pela literatura, estando dentro dos padrões aceitáveis. Então, pode-se concluir que o método de têmpera e revenimento feito nas amostras do grupo A também estão próximo dos padrões exigidos.

6.2.2 Recozimento

O tratamento térmico de recozimento foi realizado nos corpos de prova do grupo B. Uma das amostras foi analisada quanto à sua microestrutura. O resultado da análise de imagem pode ser visto na Figura 23, onde verifica-se a presença de todos os constituintes que compõem o aço AISI H13 recozido, que são carbonetos globulares distribuídos na matriz ferrítica. Dessa forma, estes resultados, estão de acordo com o encontrado na literatura citada (Figura 5) e o analisado como recebido (Figura 19).

Figura 23 - Microscopia do aço AISI H13, recozido aumentada 1000x.



Fonte: Autoria própria

Os resultados de dureza obtidos na amostra recozida estão dispostos na Tabela 7. Essa análise foi feita por meio da média e desvio padrão de cinco ensaios em regiões distintas do corpo.

Tabela 7 - Dureza do aço AISI H13 recozido

Amostras	Dureza (HRC)
1	8,5
2	9
3	8,9
4	9
5	9,1
Média	8,9
Desvio padrão	0,2

Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Pontos da medida de dureza no material recozido.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 24, são indicadas as diferentes regiões de medições, isto se deve ao fato de garantir a uniformidade do material tratamento térmico de recozimento. Com base na média aritmética destes dados é possível comparar com a fornecida pelo fabricante, e o analisado como recebido que foi de aproximadamente de 12 HRC e 11 HRC, respectivamente. Nesta comparação observa-se um valor bem inferior aos comparados. Isto se deve provavelmente ao baixo controle na etapa de resfriamento, uma vez que a taxa de resfriamento calculada destas amostras após o tratamento térmico foi de 3,3°C/min, bem distinta da literatura que é de 30°C/h.

6.3 MORFOLOGIA DO CAVACO

Para este trabalho foi proposto o estudo das deformações elásticas e plásticas no cavaco gerado durante a usinagem dos corpos-de-prova, mas como verificado na Figura 25 e Figura 26, não foi possível a realização desta etapa do estudo, pois os cavacos sofreram aquecimento diferentes (expresso na diferença de coloração) e espessuras muito finas. Além disso, numa das amostras não foi possível coletar o cavaco, pois o mesmo foi gerado de forma descontínua e bastante quebradiço.

Figura 25 - Corpo de provas e os cavacos gerados no torneamento.



Fonte: Autoria própria

Figura 26 - Corpo de provas e os cavacos gerados no torneamento (continuação).



Fonte: Autoria própria

Comparando as Figuras 25 e 26, observa-se nas amostras recozidas que quando altera-se os parâmetros de corte, ocorre a formação de um cavaco mais emaranhado e com uma coloração dourada, que é derivada do calor gerado no processo de usinagem. Tentou-se planificar o cavaco para o estudo, porém, devido à sua fragilidade, ele se partiu e impossibilitou o estudo.

Nas amostras temperadas e revenidas, quando se modificou os parâmetros do processo, observou-se uma diminuição do emaranhamento do cavaco, e uma coloração azul em vez de dourado. Como no caso do recozido, indicando que a temperatura desenvolvida no processo de usinagem foi mais alta devido ao fato do material possuir uma dureza superior. Na última amostra, com velocidade de corte de 121 m/mm e profundidade de corte de 0,2 mm, não foi possível recolher cavaco, pois o mesmo foi formado com tamanho muito pequeno e quebradiço.

6.4 RUGOSIDADE

Na Tabela 8 são mostrados os valores de rugosidade das amostras submetidas ao tratamento térmico de recozimento e ao tratamento térmico de têmpera mais revenimento.

Tabela 8 - Valores das rugosidades dos corpos de prova após o torneamento.

Tratamento térmico	Amostra	V _c	a _p	Rugosidade (μm)	Rugosidade (μm) - média e desvio padrão
Recozimento	1	95 m/min	0,1 mm	0,669	0,660 ± 0,100
				0,661	
				0,649	
Temp + Rev	2	95 m/min	0,1 mm	2,463	2,406 ± 0,053
				2,397	
				2,359	
Recozimento	3	95 m/min	0,2 mm	0,91	0,934 ± 0,036
				0,976	
				0,916	
Temp + Rev	4	95 m/min	0,2 mm	1,089	1,100 ± 0,066
				1,171	
				1,041	
Recozimento	5	121 m/min	0,1 mm	0,86	0,873 ± 0,073
				0,808	
				0,952	
Temp + Rev	6	121 m/min	0,1 mm	1,702	1,499 ± 0,245
				1,226	
				1,568	
Recozimento	7	121 m/min	0,2 mm	0,998	0,973 ± 0,054
				0,911	
				1,009	
Temp + Rev	8	121 m/min	0,2 mm	1,969	2,111 ± 0,125
				2,162	
				2,203	

Fonte: Autoria própria

Considerando os parâmetros de usinagem, as amostras 2 e 4 possuem valores de velocidades de corte iguais e diferentes valores de profundidades de corte. Por isso espera-se um maior valor de rugosidade para a amostra 4, devido a profundidade de corte ser maior. Entretanto, o valor da rugosidade para a amostra 4 é menor do que o da amostra 2, o que demonstra que o ensaio da amostra 2 pode ser descartado. Uma hipótese para esta discrepância no valor da rugosidade é que o material tenha sofrido encruamento durante a etapa de usinagem, dificultando o processo de desbaste, o que gerou um maior calor e vibração do sistema, resultando na piora do acabamento superficial da peça.

Por meio dos dados é possível observar que todos os materiais recozidos possuem uma rugosidade inferior aos que foram temperados e revenidos, visto que os materiais recozidos possuem níveis de dureza inferiores aos materiais

temperados mais revenidos (demonstrado na Seção 6.2). Os baixos níveis de rugosidade podem ser resultado da microestrutura de carbonetos globulares distribuído em uma matriz ferrítica, que gera uma maior ductibilidade e usinabilidade. Consequentemente, em todos os corpos de prova recozidos não ocorreu uma variação considerável em seus valores com a mudança dos parâmetros de usinagem.

Quando se compara os corpos de prova com o mesmo tratamento e usinados com parâmetros diferentes, observa-se uma mudança na rugosidade quando se altera os parâmetros de corte. Um exemplo disto é a comparação entre a amostra 4 e 6, sabe-se que a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte V_c e a diminuição da profundidade de corte; todavia, neste caso ocorreu um aumento. Uma provável explicação para tal fato foi a observação do aumento no ângulo de contato na ponta da ferramenta de corte, este fato gera um maior contato entre a ferramenta de corte e a peça, gerando um maior calor e uma maior vibração, situações estas que aumentam a rugosidade da peça. O aumento do ângulo de contato na ponta da ferramenta de corte é proveniente de fatores: dureza do material, ausência de fluido, parâmetro de profundidade, aquecimento da ferramenta e entre outros. Para que isso não ocorra novamente foi substituída a ferramenta de corte por uma nova nas análises posteriores.

Comparando as amostras 6 e 8, observa-se um aumento na rugosidade quando se aumenta a profundidade de corte, mesmo aplicando uma velocidade de corte idêntica em ambas, por conta do maior aquecimento e deformação gerado. Esse resultado já era esperado, de acordo com referencial teórico citado, pois possuem características iguais (microestrutura e dureza), validando a análise realizada.

Através da média ($0,904 \mu\text{m}$) e desvio padrão ($\pm 0,139$) da rugosidade obtida a partir das amostras recozidas informadas na Tabela 9, pode-se obter um padrão de rugosidade esperado. Comparando estes valores com o resultado da amostra 4 ($1,100 \pm 0,066 \mu\text{m}$), é possível indicar que os parâmetros aplicados nesta análise aproximam do padrão de rugosidade. Visto que a usinagem foi realizada a seco e, para se obter um melhor acabamento, é recomendado uma usinagem utilizando fluido de corte, para facilitar a operação do corte. Se tratando de um material com elevada dureza, com microestrutura martensítica, e carbonetos globulares, a aplicação do fluido reduziria o atrito entre a peça e a ferramenta de corte, e assim o

calor dissiparia com maior facilidade, ocorrendo então uma menor vibração do sistema e portanto uma diminuição da rugosidade da peça. Se tal processo for aplicado a amostra 4, é possível atingir valores inferiores de rugosidade dos da média e desvio padrão das amostras recozidas.

Tabela 9 - Média e desvio padrão de rugosidade das amostras recozidas.

Amostras	Rugosidade (μm)
1	0,660
3	0,934
5	0,873
7	0,973
Média	0,904
Desvio padrão	0,139

Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi certificado que o tratamento térmico de recozimento no aço AISI H13 (comumente utilizado na indústria) pode promover uma melhora significativa na rugosidade através do tratamento térmico de têmpera e revenimento, desde que se regule os parâmetros de usinagem. Como foi demonstrado nos resultados obtidos, existe uma faixa ideal de configuração dos valores de velocidade e profundidade de corte (parâmetros de usinagem), para que o tratamento térmico proposto pelo estudo se aproxime do mais aplicado na indústria, através da análise da rugosidade.

Apesar dos resultados da rugosidade da amostra 2 ($2,406 \pm 0,053$) serem desconsiderados para a discussão, a microestrutura dos corpos de prova estava de acordo com o que aponta a literatura referenciada, após a realização dos tratamentos térmicos. Isto é identificado através da comparação das imagens geradas pelo microscópio óptico. Validando o tratamento realizado em laboratório, dando confiabilidade na proposta do trabalho e às técnicas utilizadas pelo proponente deste trabalho.

Por fim, é possível afirmar também que o tratamento térmico influi no tempo de fabricação da peça, visto que, pode fornecer uma rugosidade mais adequada à aplicação, reduzindo, ou mesmo eliminando, alguns processos abrasivos finais de produção de matrizes, moldes e entre outros. Consequentemente, influencia na determinação dos custos finais de produção, gerando menos custos para a indústria.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar fluido de corte na etapa de usinagem, para diminuir o contato entre a ferramenta de corte e a peça, em seguida observar a mudança no acabamento superficial.
- Utilização de uma ferramenta de corte de maior dureza, para que não ocorra o aumento de ângulo na ponta da ferramenta de corte, assim não influenciando de forma negativa no acabamento superficial após a usinagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. L. **Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura**. 2011. 197f. Tese de doutorado (Engenharia mecânica) .Niterói - RJ: Universidade Federal Fluminense, 2011.

BACALHAU, J. B.; RODRIGUES, F. M.; MESQUITA, R. A. Caracterização De Novo Aço Ferramenta Para Matrizes De Extrusão De Alumínio. São Paulo: **Tecnologia de Metalurgia, Materiais e minerais**, 2014. v. 11, n. 2, p. 112–116.

BOING, D.; BECKERT, S. F.; SCHMIDT, R. A. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NO AÇO-FERRAMENTA AISI H13 EM OPERAÇÃO DE FRESAMENTO COM FERRAMENTA DE. Campina Grande - Paraíba: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2010. p. 10.

BONFÁ, Miguel Mandú. **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos de Fabricação da, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos**. 4. ed. São Paulo: ABM, 1977.

COSTA E SILVA, A. L. DA; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

DOTTO, A. R. *et al.* **Influência das condições de usinagem por torneamento na rugosidade da peça**. Horizontina - RS: FAHOR, 2004. p. 2–3.

FORTEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Cortadora Metalográfica (80mm ou 100mm) “CFIII”**, 2018. Disponível em: <<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/cortadora-metalografica-80mm-ou-100mm>>. Acesso em: 21 novembro 2018.

GABARDO, J. F. **Estudo Da Tenacidade Do Aço Ferramenta H13 Estudo Da Tenacidade Do Aço Ferramenta H13**. 2008. 71f. Dissertação do mestrado (Engenharia mecânica) Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008.

INSTRUTHERM. **Rugosímetro digital portátil**, 2018. Disponível em: <https://www.instrutherm.net.br/rugosimetro-mod-rp-200.html#product_tabs_manual>. Acesso em: 21 novembro 2018.

KANG, Minwoo et al. The effects of annealing temperature and cooling rate on carbide precipitation behavior in H13 hot-work tool steel Minwoo. **Journal Of Alloys And Compounds Journal**. Republica da Korea, ago. 2014. p. 359-366.

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. **Proceeding in International Symposium on Liquid metal Processing and Casting**, 2003. n. 1983, p. 137–144.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MAKITA. **Serra rápida portátil**. 2018. Disponível em: <<http://www.makita.com.br/catalogos/arquivos/linhamt.pdf>>. Acesso em: 21 novembro 2018.

MARCHIORI, M. M. **Estudo de um sistema de medição a laser na análise da textura da superfície gerada por torneamento**. 2013. 82f. Dissertação do mestrado (Engenharia mecânica) Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

THONI V. PHILIP; THOMAS J. MCCAFFREY. **ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**. 10. ed. NY: ASM International, 1993. V. 1.

MONTEIRO, J. **Mecânica: Processos de Fabricação**. Espírito Santo: SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1999.

MOROZO, M. A. **Influência da Condição Superficial Na Resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço AISI H13**. 2013. 96f. Dissertação de mestrado (Engenharia de materiais). Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2013. ISBN 9781617820168.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço Dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SOARES JUNIOR, E. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de Aços-ferramentas para trabalho a frio**. 2006. 100f. Dissertação de mestrado (Tecnologia nuclear - materiais) São Paulo: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2006.

VALES, S. Dos Santos. **Estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13**. 2010. 107f. Dissertação do mestrado (Engenharia de materiais). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

VOORT, G. F. Vander. **ASM HANDBOOK Volume 9 Metallography and Microstructures**. 9. ed. NY: ASM International, 1992. V. 9.

ZEISS. **ZEISS Axioscope**, 2018. Disponível em: <<https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/light-microscopes/axioscope-for-materials.html>>. Acesso em: 21 novembro 2018.

