

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

DOUGLAS RODRIGUES DE RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DE ENGRENAGENS EM AÇO BAINÍTICO DE
RESFRIAMENTO CONTÍNUO DIN 18MnCrSiMo6-4**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

**PORTO ALEGRE – RS
2019**

DOUGLAS RODRIGUES DE RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DE ENGRENAGENS EM AÇO BAINÍTICO DE
RESFRIAMENTO CONTÍNUO DIN 18MnCrSiMo6-4**

Trabalho de diplomação de curso apresentado a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Metalúrgica, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha.

**PORTO ALEGRE – RS
2019**

CIP - Catalogação na Publicação

Rodrigues de Rodrigues, Douglas
CARACTERIZAÇÃO DE ENGRENAGENS EM AÇO BAINÍTICO DE
RESFRIAMENTO CONTÍNUO DIN 18MnCrSiMo6-4 / Douglas
Rodrigues de Rodrigues. -- 2019.
51 f.
Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Aços Bainíticos. 2. Resfriamento Controlado. 3.
Usinagem. 4. Caracterização de Cavacos. 5. Rugosidade
Superficial . I. da Silva Rocha, Alexandre, orient.
II. Título.

Trabalho de diplomação de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica. Qualquer citação atenderá as normas da ética científica.

DOUGLAS RODRIGUES DE RODRIGUES

Trabalho apresentado em ___/___/_____

Orientador Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Prof. Dr. Afonso Reguly

“Nada existe de tão difícil que não seja vencível.”
Júlio César

AGRADECIMENTOS

A tarefa de gratificar proporcionalmente a todos os envolvidos no forjamento de meu caminho acadêmico não seria conclusiva, dado o elevado número de parcelas apoiadoras que integralizadas me levaram a galgar o pretensível título de engenheiro metalurgista ao amado Brasil. É-me imperativo, entretanto, reconhecer nominalmente determinados elementos chave em minha vida, como segue abaixo:

A meus genitores, Zenir e Luiz Carlos por todo o apoio desde sempre, com seus exemplos de caráter e educação passados já na tenra idade. A minha estimada namorada Fabiane Marcilio e seus pais, Adriene e Nilson, pelo acolhimento irrestrito no seu seio familiar.

Ao LdTM e ao LAFUN, juntamente com suas equipes técnicas, em especial ao Msc. Regis Fabiano Amaral, sem o qual não seria possível se atingir o estado atual de sobriedade e consciência.

Ao Eng. Mozart Fernando Rech que se tornara um sólido exemplo a ser seguido em relação ao arquétipo clássico de engenheiro com a sua competência, bom senso e responsabilidade sem igual.

Aos Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos e Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha pelas valorosas orientações, o primeiro, no início do período de estágio laboratorial no LAFUN e o segundo, na realização deste estudo e pelo incentivo para a continuidade da vida acadêmica a um nível futuro de mestrado.

Aos amigos, Jhonatan Pacheco e Rafael Dalcin, pelo compartilhamento de ideias, bem como, os estimados colegas de trabalho, Felipe Fernandes, Endel Ferreira e Luis Arnold.

A empresa INPEL, pela oportunidade de fazer parte de seu quadro técnico efetivo e pela realização dos testes e ensaios descritos neste trabalho. Além de me propiciar numa intensa imersão na vivência da vida de metalurgista, ao permitir-me enfrentar os primeiros desafios na prática da profissão.

Por fim, uma calorosa lembrança aos demais familiares, amigos e colegas de diferentes momentos e ao povo brasileiro que financiou meu ensino público e de qualidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Ferramentas para corte de engrenagens: 1 – cortador de fresa, 2 – cortador de cremalheira, 3 – cortador de geração, 4 - caracol.....	18
Figura 2.2	Diagrama TTT representativo dos aços bainíticos avançados e as diferentes morfologias de bainita possíveis de serem formadas.....	20
Figura 2.3	Comparativo microestrutural de diferentes diâmetros de barras de aços bainíticos..	22
Figura 2.4	Diagrama de tensão deformação entre aços bainíticos com outras classes de aços.....	22
Figura 2.5	Relação de microestrutura e cavaco formado em aço DIN 42CrMo4. (a) amostra com martensita revenida e cavaco formado; (b) amostra composta por bainita e cavaco formado.....	24
Figura 2.6	Relação estabelecida entre a formação do cavaco e as propriedades do material usinado.....	26
Figura 2.7	Caracterização da forma dos cavacos exemplificada.....	27
Figura 2.8	Fatores de influência na rugosidade de uma superfície usinada.....	28
Figura 3.1	Fluxograma mostrando as duas rotas produtivas.....	29
Figura 3.2	Microestrutura dos aços como-recebido (a) aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4 com a presença de bainita granular e microestrutura refinada; (b) aço DIN 20MnCr5 com a presença de ferrita pró-eutetoide e perlita..	31
Figura 3.3	Processo de forjamento das engrenagens ilustrado pelas fotos e pelas setas, partindo da introdução e aquecimento por indução do blank, passando para a introdução do blank na matriz de forjamento, forjamento das pré-formas das engrenagens, extração e rebarbação..	31
Figura 3.4	Peças obtidas após forjamento a quente (a) dimensões do billet; (b) dimensões do forjado..	32
Figura 3.5	Desenho técnico da prensa de fricção utilizada.....	33
Figura 3.6	Macrografia de um dos forjados utilizados no estudo com a região da caracterização metalúrgica.....	34

Figura 3.7	Operações de usinagem na fabricação das engrenagens (a) Torno 1; (b) Brochadeira; (c) Torno 2; (d) Geradora de dentes.	35
Figura 3.8	Forma de caracterização da forma dos cavacos exemplificada.....	37
Figura 3.9	Posições de medição (a) Flanco de dente; (b) Topo de dente; (c) Face oposta	37
Figura 4.1	Comparativo entre as amostras de aço antes do forjamento e após os tratamentos térmicos aplicados aos aços DIN 18MnCrSiMo6-4 e DIN 20MnCr5.....	39
Figura 4.2	Resultados das formas obtidas pelos dois aços, com base comparativa dada pela tabela da referência da literatura, utilizando as mesmas máquinas operatrizes, as mesmas ferramentas e os mesmos parâmetros de corte na usinagem das engrenagens em aço DIN 20MnCr5 e em aço DIN 18MnCrSiMo6-4.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química % em peso e propriedades mecânicas de alguns aços bainíticos comerciais forjados de diferentes empresas e centros de pesquisa.....	21
Tabela 2.2	Aços utilizados no estudo de SMOLENICKI e suas respectivas propriedades mecânicas de tensão máxima de tração e resistência ao impacto.....	25
Tabela 2.3	Propriedades mecânicas especificadas para cada classe de ADI segundo a ASTM A897/897M	9
Tabela 3.1	Composições químicas e algumas propriedades mecânicas dos aços DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4 utilizados nos experimentos	30
Tabela 3.2	Características das máquinas, com seu ano de fabricação, modelo e país	33
Tabela 3.3	Parâmetros das máquinas operatrizes utilizadas na fabricação das engrenagens	36
Tabela 4.1	Durezas obtidas nas amostras antes do forjamento e após os tratamentos aplicados aos dois materiais	41
Tabela 4.2	Resultados das formas obtidas pelos dois aços, com base comparativa dada pela tabela de referência da literatura, utilizando as mesmas máquinas operatrizes, as mesmas ferramentas e os mesmos parâmetros de corte na usinagem das engrenagens em aço DIN 20MnCr5 e em aço DIN 18MnCrSiMo6-4	40
Tabela 4.3	Valores de rugosidade Ra e Rz e seus desvios estatísticos obtidos pelas medições das engrenagens fabricadas com o aço DIN 20MnCr5 (a) Medição Paralela ao Flanco do Dente; (b) Medição Perpendicular ao Topo do Dente; (c) Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem.....	43
Tabela 4.4	Valores de rugosidade Ra e Rz e seus desvios estatísticos obtidos pelas medições das engrenagens fabricadas com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 (a) Medição Paralela ao Flanco do Dente; (b) Medição Perpendicular ao Topo do Dente; (c) Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem.....	44
Tabela 4.5	Comparativo entre as rugosidades médias gerais de Ra e Rz, com seus respectivos desvios estatísticos, em relação a posição de medição e aos aços utilizados.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
ϵ	Alongamento;
γ	Austenita;
Fe_3C	Cementita;
CP	Corpo de Prova;
HV	Dureza Vickers.
σ	Desvio Padrão;
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
α	Ferrita;
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius;
MPa	Mega Pascal;
UTS	Resistência máxima;
YS	Resistência ao escoamento;
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação;
tnf	Tonelada-força
t_A	Tempo de austêmpera;
J	Joules;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 Engrenagens.....	17
2.1.1 Fabricação de engrenagens	17
2.1.2 Matéria-prima.....	18
2.1.3 Tratamento térmico de engrenagens.....	19
2.2 Aços bainíticos.....	19
2.2.1 Microestrutura.....	20
2.2.2 Forjabilidade.....	23
2.2.3 Usinabilidade.....	23
2.3 Técnicas de caracterização.....	25
2.3.1 Formatos de cavacos de usinagem.....	25
2.3.2 Rugosidade superficial.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Materiais.....	29
3.1.1 Aços utilizados.....	29
3.1.2 Caracterização metalúrgica.....	30
3.2 Métodos	31
3.2.1 Equipamento de conformação	32
3.2.2 Máquinas operatrizes de usinagem	33
3.2.3 Caracterização metalúrgica do forjado	34
3.2.4 Usinagem das engrenagens	34
3.2.5 Caracterização do formato dos cavacos	36

3.2.6	Avaliação do acabamento superficial	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Análise microestrutural após forjamento e tratamento térmico	39
4.2	Formato dos cavacos obtidos	39
4.3	Avaliação do acabamento superficial	43
5	CONCLUSÕES.....	46
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
7	CUSTOS.....	48
8	REFERÊNCIAS	49

RESUMO

Os aços bainíticos de resfriamento controlado têm se mostrado excelentes materiais de escolha em projetos de componentes automotivos e agrícolas por reunirem propriedades mecânicas ideais de resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, forjabilidade e usinabilidade. Diferentes pesquisadores têm demonstrado através de seus trabalhos acadêmicos as vantagens existentes ao se utilizar esta classe de aço, muito embora sejam materiais considerados novos para o contexto mundial, possuem um futuro promissor como alternativa de matéria-prima. O foco para este trabalho é a caracterização de engrenagens cônicas espirais pelo método *Gleason* de produção com o aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4, comparativamente ao aço ferrítico-perlítico DIN 20MnCr5, através do forjamento a quente, resfriamento ao ar e usinagem até geometria final. Para o estudo realizado neste trabalho, foram utilizados os métodos de caracterização metalúrgica que permitissem extrair parâmetros de comparação com engrenagens fabricadas com o aço DIN 20MnCr5 por metalografia, dureza, formato dos cavacos formados após cada operação de usinagem realizada e medição da rugosidade superficial final obtida. Os resultados apresentam grande similaridade entre os dois aços utilizados, com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 equiparando-se ao DIN 20MnCr5 em todas as relações feitas. Para os mesmos parâmetros de usinagem nas operações propostas, teve-se praticamente a mesma morfologia de cavacos e grau de acabamento superficial sem variações que pudessem desqualificar a usinabilidade do aço bainítico testado. Ratifica-se o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 como um material de igual ou melhor usinabilidade para a fabricação de engrenagens com o aço DIN 20MnCr5, com base na metodologia empregada. Ainda, o aço bainítico pode conferir propriedades mecânicas significativamente melhores, maior tenacidade e resistência mecânica e os tratamentos térmicos convencionais de têmpera e revenido podem ser evitados.

Palavras chave: Aços Bainíticos, Forjamento a quente, Resfriamento Controlado, Usinagem, Caracterização de Cavacos, Rugosidade Superficial

ABSTRACT

Controlled cooling bainitic steels have proven to be excellent materials of choice in automotive and agricultural component designs, because they have optimal mechanical properties of mechanical strength, toughness, ductility, forgeability and machinability. Different researchers have demonstrated through their academic work the advantages of using this class of steels, although this material is considered new to the world context, they have a promising future as a raw material alternative. The focus of this work is the characterization of spiral bevel gears by the Gleason production method with DIN 18MnCrSiMo6-4 bainitic steel, compared to ferrite-perlite DIN 20MnCr5 steel, through hot forging, air cooling and machining to final geometry. For the study carried out in this work, metallurgical characterization methods were used to extract comparison parameters for gears manufactured with DIN 20MnCr5 steel by metallography, hardness, chip shape characterization formed after each machining operation performed and measurement of the final surface roughness obtained. The results show great similarity between the two steels used, with DIN 18MnCrSiMo6-4 steel equating to DIN 20MnCr5 in all established comparisons. For the same machining parameters in the proposed operations, it was practically the same chip morphology and surface finish degree without variations that could disqualify the machinability of the tested bainitic steel. DIN 18MnCrSiMo6-4 steel is ratified as a material of equal or better machinability for the manufacturing of gears with DIN 20MnCr5 steel, based on the methodology employed. Besides that the bainitic steel can provide higher toughness and mechanical resistance to the components, and conventional hardening and tempering treatments can be avoided.

Keywords: Bainitic Steels, Hot Forging, Controlled Cooling, Machining, Chip Characterization, Surface Roughness

1. INTRODUÇÃO

A ciência dos materiais e os processos empregados na fabricação de engrenagens têm sido aliados na busca por atender aos anseios futuros no desenvolvimento de matérias-primas para componentes cada vez mais baratos, com menor consumo energético de fabricação, mais leves e sem queda de performance na aplicação final. Com isso, surge a necessidade do estudo para o melhor entendimento de como estes novos materiais, como os aços bainíticos, comportar-se-ão durante a sua cadeia produtiva.

Em sistemas de transmissões mecânicas, as engrenagens possuem papel fundamental para a efetividade de todo o conjunto montado, o fabrico convencional destas partes passa por muitas operações com um alto custo energético no somatório final. Os materiais mais empregados para a produção destas partes são os aços para cementação que propiciam tenacidade para os esforços de flexão na raiz do dente e resistência ao desgaste na superfície aos esforços de contato durante o engrenamento.

Em conjuntos de transmissão para a indústria agrícola, necessita-se um tipo de transmissão que utiliza eixos perpendiculares, o que torna insubstituível o uso das engrenagens cônicas espirais *Gleason* para este fim. Durante as principais operações de manufatura destas peças em aço para cementação, seguem o forjamento para pré-forma, tratamento térmico de normalização para homogeneização da microestrutura e redução de dureza, usinagem de precisão em máquinas CNC com torneamento, furação, brochamento e dentamento para posterior tratamento térmico de beneficiamento para endurecimento e montagem final. Com o domínio dos equipamentos, hoje em dia se tem um domínio do *know how* dos parâmetros empregados conforme a resposta de como o material se comporta.

O desenvolvimento de aços com maior economia de energia, sem comprometimento de propriedades mecânicas para a aplicação final de componentes são fatores preponderantes na indústria automotiva e agrícola. A análise de novos materiais que tenham o potencial de utilizar menos energia durante o processo produtivo para o futuro é objeto de pesquisa em vários centros de pesquisa no mundo atualmente.

Atualmente, muitos aços avançados tem sido objetivo de investigação para um futuro próximo muito mais competitivo, seja nas usinas siderúrgicas em não perder espaço no mercado para os materiais compósitos, seja nas fábricas de componentes de alto desempenho que necessitam de novas possibilidades de material para a complexidade dos projetos. Os aços bainíticos se apresentam como um ideal de dois mundos, sendo a presença tanto de tenacidade, quanto de resistência mecânica através do controle do resfriamento após a conformação mecânica a quente, o diferencial para estes materiais. Não havendo de realizar-se outro ciclo térmico para obtenção da dureza final, uma vez que o controle do resfriamento já resulta no desejado, a não ser quando se deseja aumentar adicionalmente a resistência ao desgaste, quando devem ser adicionados tratamentos superficiais (têmpera por indução, “shotpeening”, nitretação, dentre outros). Com isso também surge a necessidade de se conhecer como será a manufatura com esta nova matéria-prima que está por vir.

Este trabalho se propõe a avaliar, comparativamente, o desempenho na usinagem do aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4 com os parâmetros utilizados para o aço ferrítico-perlítico DIN 20MnCr5 na fabricação de engrenagens cônicas espirais *Gleason* no que se refere à análise fotográfica do formato dos cavacos formados nas operações em torno CNC de torneamento e furação, brochamento em brochadeira vertical e geração de dentes pelo método *Gleason* de fabricação. A rugosidade final das engrenagens também foi considerada como fator quantitativo importante na avaliação da qualidade obtida para comparação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Engrenagens

Engrenagens são elementos de transmissão mecânica, utilizados para mudança de velocidade ou de torque em dispositivos rotativos. Tendo as mais amplas e variadas aplicações, desde abridores de lata até caixas de câmbio de veículos automotores (NORTON, 2004).

Os tipos existentes de engrenagens possuem as mais variadas configurações destinadas a aplicações particulares de transmissão de torque e rotação, como: cilíndricas de dentes retos, cilíndricas helicoidais, cilíndricas helicoidais duplas, pinhão e cremalheira, rosca sem fim e coroa, engrenagens cônicas de dentes retos, engrenagens cônicas espirais (SHIGLEY, 2005).

2.1.1 Fabricação de Engrenagens

A fabricação de engrenagens se classifica em métodos de conformação e em métodos de usinagem. Por conformação, tem-se os dentes da engrenagem todos fabricados ao mesmo tempo e com dependência da qualidade da matriz ou da moldagem utilizada por fundição, sinterização, estampagem ou extrusão. Já pelo processo de usinagem, tem-se a remoção de material por desbaste ou por acabamento utilizando técnicas de corte e/ou polimento para dar a forma final da geometria dos dentes desejados (NORTON, 2004).

As engrenagens metálicas largamente produzidas no mundo são feitas por usinagem com ferramentas tipo cortador de fresa com a forma do dente projetado, cortador de cremalheira, cortador de geração ou fresa caracol, conforme ilustrado pela figura 2.1. Isto deve-se ao fato de haver um menor custo no ferramental em comparação aos métodos de conformação e a maior qualidade de acabamento obtida (NORTON, 2004).

Figura 2.1 Ferramentas para corte de engrenagens: 1 – cortador de fresa, 2 – cortador de cremalheira, 3 – cortador de geração, 4 – caracol.



Fonte: (NORTON, 2004)

Na fabricação de engrenagens por geração, a ferramenta empregada possui a forma de uma engrenagem (número 3, da figura 2.1) para que o corte ocorra em movimentos alternados em deslocamento axial e assim produzir os dentes na geometria e ângulo adequados do projeto (SHIGLEY, 2005).

2.1.2 Matéria-prima

São vários os materiais utilizados na fabricação de engrenagens, indo desde polímeros e aços, até ligas não ferrosas. Sendo os aços, muitas vezes, os preferenciais na escolha de projetos para diferentes aplicações por deterem maior versatilidade dada as vastas propriedades mecânicas alcançáveis, cita-se o uso de aços ao carbono e aços ligados que exibem maior resistência e maior vida em fadiga aos componentes após tratamentos térmicos de endurecimento (RAKHIT, 2000).

Normalmente, são escolhidos aços ligados para a fabricação de engrenagens por terem maior temperabilidade e assim terem maior resistência mecânica na secção transversal das peças. Os aços ligados comumente utilizados na manufatura deste tipo de componente de transmissão são os aços ligados ao cromo e ao molibdênio, como os aços SAE 4140, SAE 4340, SAE 8620, SAE 9310, DIN 20MnCr5 (ASTM Vol. 4, 1991).

2.1.3 Tratamento térmico de engrenagens

A maioria dos tratamentos térmicos empregados para engrenagens que visam aumentar a resistência mecânica e a resistência ao desgaste são escolhidos com base em cinco tipos diferentes: têmpera total em forno, cementação, nitretação, carbonitretação e têmpera por indução. Sendo os aços com teor maior ou igual que 0,3% de carbono aplicados a têmpera total em forno ou a têmpera superficial por indução eletromagnética. Já aços com baixo teor de carbono, até 0,2%C, são aplicados tratamentos termoquímicos em atmosferas ativas ricas em carbono e nitrogênio (ASTM Vol. 4, 1991).

O tratamento térmico aplicado a engrenagens em aço pode ser compreendido o aquecimento até austenitização, permanência num patamar de temperatura por um período de tempo baseado na secção da peça (encharque) e resfriamento para transformação martensítica com dependência de cada aço. No caso da cementação, há a introdução de uma atmosfera ativa que permita que aços de baixo teor de carbono tenham um tratamento especial de introdução de carbono (termoquímico) na superfície por difusão e posterior têmpera e endurecimento. O tratamento térmico de revenimento é sempre realizado após a têmpera com o intuito de propiciar o mínimo de tenacidade ao componente e aliviar tensões térmicas que tenham sido geradas durante o resfriamento (HAKHIT, 2000).

2.2 Aços Bainíticos

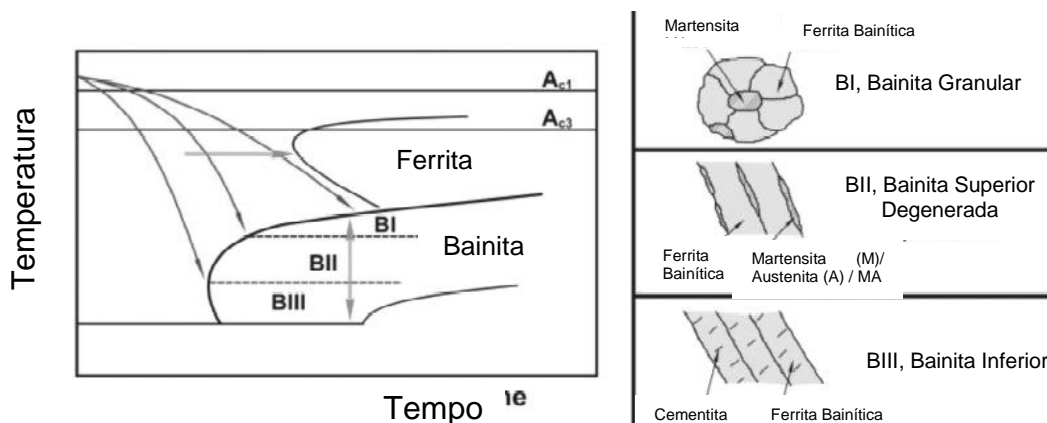
Muitos estudos têm sido feitos com novos materiais com o objetivo de se reduzir a energia, os custos e a eliminação de etapas produtivas na fabricação de peças automotivas. Através do controle do resfriamento diretamente após o forjamento a quente com a presença de elementos de liga que retardem a formação de ferrita alotriomórfica e de perlita, a cinética de formação da bainita apresenta-se tendo possibilidade de ocorrer. Esta microestrutura possui propriedades mecânicas tais que em projetos de componentes, permitem atingir resistência mecânica desejada, alongamento e tenacidade adequados (BHADESHIA, 2001).

2.2.1 Microestrutura

Os aços bainíticos de resfriamento contínuo apresentem uma microestrutura considerada multifásica, com a presença de diferentes morfologias de bainita, como a bainita granular, a bainita de placas degeneradas, a tipo superior e a bainita inferior. Além da presença de fases como ferrita, austenita retida e frações de martensita até mesmo (HASLER, 2011).

O diagrama de temperatura-tempo-transformação (TTT) nos aços bainíticos é expresso na figura 2.2, sendo possível se observar como a influência do elemento carbono provoca a redução do início da temperatura de transformação da bainita, assim como, o manganês que exerce o mesmo efeito. Elementos como o cromo e o molibdênio aumentam a temperabilidade deste tipo de material. Já o titânio e o nióbio permitem refinar a o grão austenítico (ROELOFS, 2014; BUCHMAYER, 2016).

Figura 2.2 Diagrama TTT representativo dos aços bainíticos avançados e as diferentes morfologias de bainita possíveis de serem formadas.



Fonte: Adaptado de HASLER, 2011.

Algumas classes comerciais desenvolvidas para a família dos aços bainíticos são expressas na Tabela 2.1, a composição química principal destes aços é composta por carbono, manganês, silício e cromo. Estes elementos de liga possibilitam ampliar as taxas de resfriamento para a obtenção microestrutural de bainita/martensita. Por estes aços atingirem resistências máximas superiores a 1000Mpa e alongamentos da ordem de 10%, tornam-se apreciáveis potenciais a aplicações diversas na indústria.

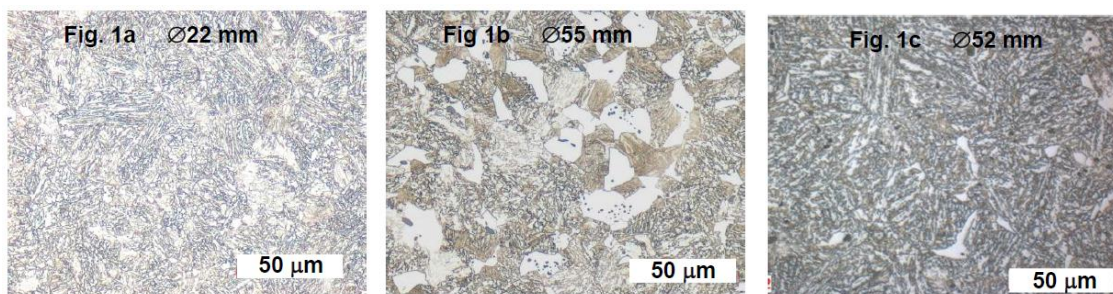
Tabela 2.1 Composição química em % em peso e propriedades mecânicas de alguns dos aços bainíticos comerciais forjados de diferentes empresas e centros de pesquisa.

Nome Comercial	%C	%Mn	%Si	%Cr	YS [Mpa]	Rm [Mpa]	Alongamento [%]	Empresa / Centro de Pesquisa
20MnCrMo7	0,22	1,72	0,49	1,6	860	1250	14	EZM
HDB	0,17	1,52	1,46	1,32	782	1167	12,5	RWTH
Solam B1100	<0,2	<1,9	-	<1,5	>700	>1100	>15	Arcelor
Metasco MC	0,25	1,3	0,9	0,8	>700	>1000	>15	Ascometal
HSX 130HD	0,17	1,5	1,2	1,2	1030	1170	16,2	Swiss Steel
LUT-1 20MnCr5	0,20	1,3	0,5	1,1	850	1100	15	Uni Leoben

Fonte: Adaptado de BUCHMAYR, 2016.

ROELOFS (2014), demonstrou que para o aço HSX Z12, uma fina e homogênea microestrutura pode ser obtida em diâmetros de 22mm (Fig. 2.3 1a), já em barras de diâmetros maiores (Fig. 2.3 1b e 1c) encontra-se a presença de bainita de grãos grosseiros com frações microestruturais de ferrita e martensita com dependência direta do tratamento termomecânico aplicado. Denotando uma clara combinação de fatores na obtenção da microestrutura final desejada em um processo de atingimento de taxas de resfriamento controlado, aliado à composição química e a seção do material.

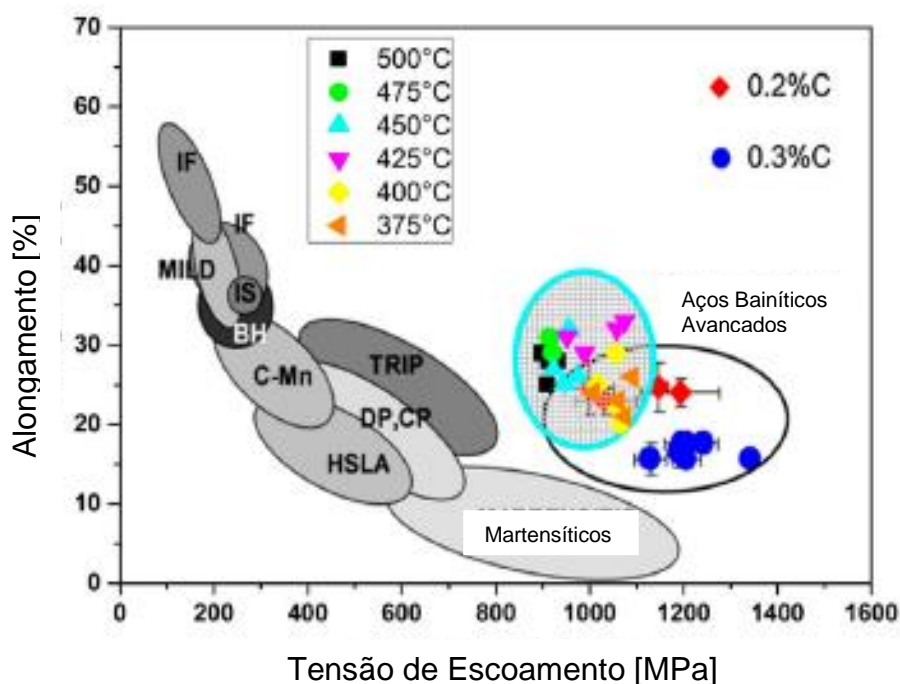
Figura 2.3 Comparativo microestrutural de diferentes diâmetros de barras de aços bainíticos.



Fonte: Adaptado de ROELOFS, 2014.

Na figura 2.4, é possível se observar a relação existente entre os aços bainíticos de baixo carbono formados a partir de diferentes temperaturas, em relação a tensão de escoamento (MPa) e alongamento (%), comparativamente, a outras classes de aços já conhecidas e difundidas comercialmente. Pode-se notar pelo diagrama tensão vs. deformação que a classe dos bainíticos permite atingir tensões de escoamento maiores que os TRIP, HSLA e martensíticos, com um alongamento igual ou maior em relação aos citados.

Figura 2.4 Diagrama de tensão deformação entre aços bainíticos com outras classes de aços.



Fonte: B. Buchmayer, 2016.

Os aços bainíticos de resfriamento controlado apresentam uma alternativa viável em comparação aos aços de construção mecânica temperados e revenidos de um modo geral. O resfriamento ao ar mostra ser suficiente no atingimento de microestruturas alvo que permitam se ter propriedades mecânicas que unem resistência, ductilidade e tenacidade, conforme citado por HASLER, em 2011.

2.2.2 Forjabilidade

Os materiais distinguem-se quanto ao seu comportamento em frágeis e em dúcteis com base na sua resistência mecânica. A deformação, em especial nos aços, conduz a significativas alterações microestruturais que refletirão nas propriedades mecânicas finais e a forma geométrica desejada de um componente (COSTA E SILVA, 2006).

Devido a resposta com que os materiais se comportam ao serem aplicadas solicitações mecânicas com vistas a deformação permanente no campo plástico, a forjabilidade é considerada como uma característica fundamental atribuída aos materiais quando destinados a processos que envolvam conformação mecânica, seja ela a quente ou a frio (DIETER, 1981).

2.2.3 Usinabilidade

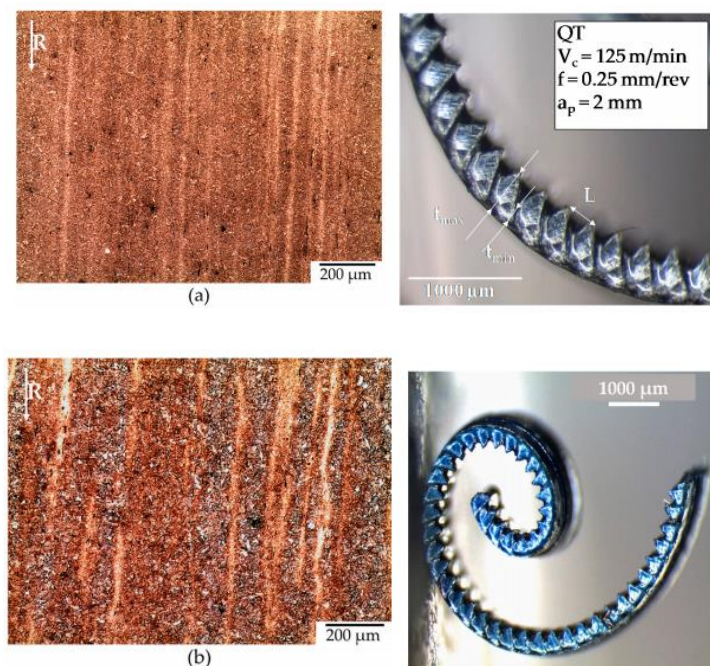
Usinagem tem por conceito a remoção de material até a produção de uma peça com forma, dimensões e acabamento com a formação de cavaco, sendo aplicado de forma geral a todos os processos que venham a gerar esta porção de material caracterizado pela geometria irregular e não mais pertencente a peça produzida. Subdivide-se a usinagem pelo tipo de ferramentas utilizadas, de geometria definida ou de geometria indefinida (DIN 8580; FERRARESI, 1986).

Na literatura especializada no estudo da usinabilidade dos materiais, há muitos poucos trabalhos que correlacionem a influência microestrutural dos aços com os processos de formação de cavaco. Normalmente, os pesquisadores citam somente como informação de caráter complementar a composição química e as propriedades mecânicas do material (HADDAD, 2019).

No trabalho de HADDAD (2019), foi feito o estudo comparativo entre diferentes aspectos da usinagem na caracterização de duas microestruturas

majoritariamente definidas, martensita revenida e bainita do aço DIN 42CrMo4. A avaliação do torneamento aplicado a barras de 45mm de secção, com variação de velocidade de corte de 0,05mm/rev até 0,4 mm/rev e avanço de ferramenta variando de 50m/min até 650m/min. Foi mostrado que a diferença observada foi na amostra temperada e revenida, com transição do formato do cavaco de contínuo para fragmentado, com velocidades de corte no intervalo de 75 a 100m/min e larga variação do comprimento do cavaco. Afirmando, ainda, não ter tido diferença significativa para a amostra bainítica quanto a forma do cavaco formado. A figura 2.5 demonstra o comparativo estudado.

Figura 2.5 Relação de microestrutura e cavaco formado em aço DIN 42CrMo4. (a) amostra com martensita revenida e cavaco formado; (b) amostra composta por bainita e cavaco formado.



Fonte: Adaptado de HADDAD, 2019.

A usinabilidade dos aços bainíticos tem sido estudado em aspectos específicos, como o uso da tomografia computadorizada aplicada a operações de furação. Onde pode-se caracterizar a formação dos cavacos formados, comparando-se o aço comercial HSX130®HD com microestrutura predominante formada por bainita granular, o aço de bainita inferior DIN 10MnB13 e o aço temperado e

revenido DIN 51CrV4. Os resultados mostram que materiais de maior ductilidade, possuem o aumento das forças de corte, maior taxa de recalque do cavaco e maior espessura do cavaco nos processos de corte. A tabela 2.2 mostra as propriedades mecânicas nas amostras estudadas. O comportamento da usinabilidade é apontado como dependente do nível de tenacidade dos materiais, tendo os aços bainíticos uma resposta similar ou mesmo igual a aços de construção mecânica (SMOLENICKI, 2012).

Tabela 2.2 Aços utilizados no estudo de SMOLENICKI e suas respectivas propriedades mecânicas de tensão máxima de tração e resistência ao impacto.

Material	Tensão Máxima de Tração [N/mm ²]	Resistência ao Impacto [J]
HSX130®HD (Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo)	980	20
DIN 51CrV4	1070	80
DIN 10MnB13 (Aço com Bainita Inferior)	1068	180

Fonte: Adaptado de SMOLENISKI, 2012.

2.3 Técnicas de caracterização

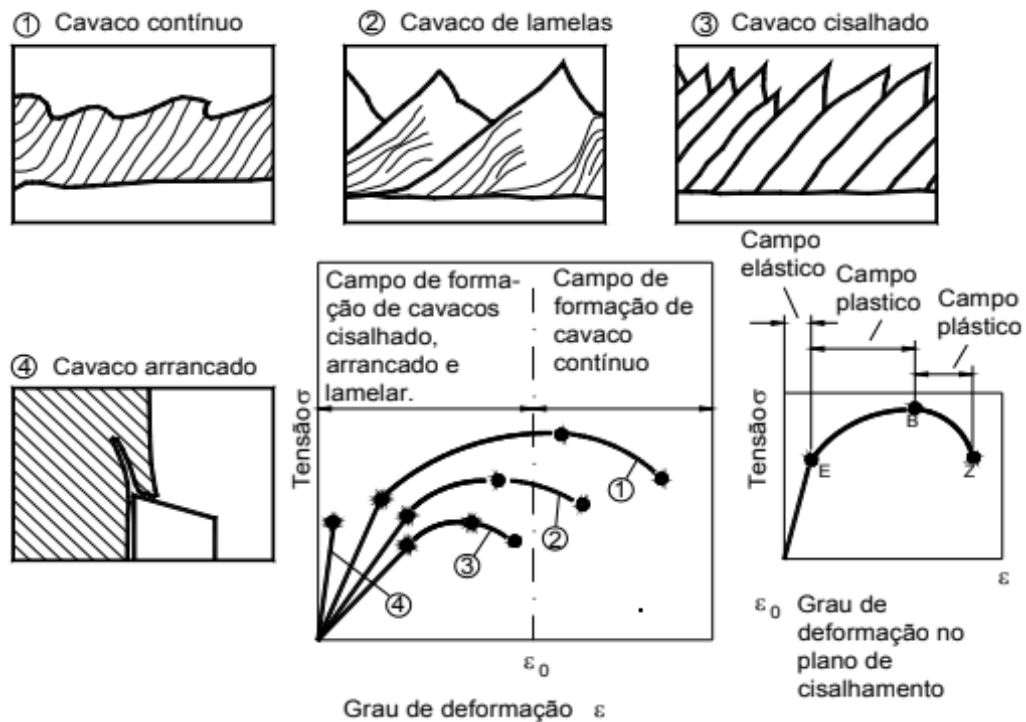
Nesta secção serão apresentadas as técnicas utilizadas neste trabalho para caracterização das engrenagens fabricadas. Com objetivo de comparar de forma igual os principais aspectos apresentados ao que se refere ao formato dos cavacos de usinagem e a rugosidade final obtida.

2.3.1 Formato dos cavacos de usinagem

Os tipos de cavacos com possibilidade de serem formados possuem dependência não somente com as propriedades mecânicas do material usinado, mas também, com os parâmetros de corte empregados na usinagem, as forças presentes no corte, o desgaste natural de ferramentas e o tipo de lubrificação aplicada. Sendo os cavacos contínuos característicos de materiais que apresentem uma grande deformação plástica até a ruptura, cavaco em lamelas, cavaco

cisalhado e arrancado tendem a ser formados por materiais com menor ductilidade, conforme pode ser ilustrado pela figura 2.6 (KLOCKE, 2010).

Figura 2.6 Relação estabelecida entre a formação do cavaco e as propriedades do material usinado.



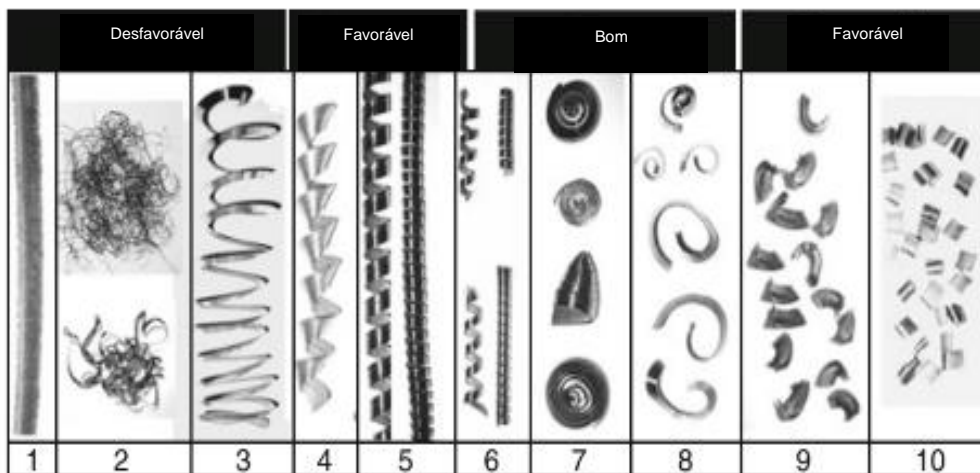
Fonte: Adaptado de KLOCKE, 2010.

A usinabilidade de um material é baseada no comparativo resultante de ferramenta-peça usinada a um material padrão, cujas propriedades referentes a usinagem já sejam conhecidas e preferencialmente quantificadas. Não podendo ser considerado, entretanto, uma grandeza específica referente a cada material, mas determinada pelas características de maior relevância para este tipo de qualificação, como a força de usinagem, a vida útil de ferramenta, o acabamento superficial da peça usinada, temperatura de corte, produtividade e o formato de cavaco formado. Devido ao grande interesse inerente aos processos de usinagem, desenvolve-se testes e métodos de ensaio que permitam estabelecer o quão fácil é a remoção de um material por uma ferramenta (FERRARESI, 1986; NBR 6175, 2015).

A literatura especializada nos processos de usinagem oferece meios qualitativos de se classificar a usinabilidade que um material oferece por decorrência

do tipo de cavaco a se formar. Qualitativamente pode ser feita a caracterização baseada na forma do material removido de uma peça por meio de fotografia. A figura 2.7 demonstra como pode ser feita esta classificação visual (KLOCKE, 2010).

Figura 2.7 Caracterização da forma dos cavacos exemplificada.



1 Cavaco em fita

2 Cavaco emaranhado

3 Cavaco em hélice plano

4 Cavaco angular em hélice

5 Cavaco em hélice

6 Cavaco em segmento de hélice

7 Cavaco cilíndrico em hélice

8 Cavaco espiral

9 Cavaco de seguimento espiral

10 Cavaco descontínuo

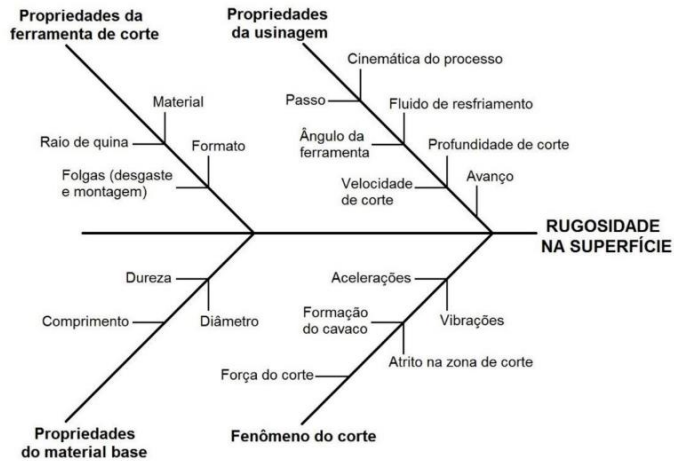
Fonte: Adaptado de KLOCKE, 2010.

2.3.2 Rugosidade

O processo de usinagem de uma peça, acarreta por produzir um acabamento final na sua superfície devido a vários fatores correlacionados, como é mostrado na figura 2.8. Com a rugosidade sendo considerada como o parâmetro mais prático de ser mensurado o grau de acabamento, sendo medida de forma mecânica ou ótica (ABNT, 2002).

A microestrutura e a dureza terão influência direta nos valores de rugosidade medidas em aços usinados. Tratamentos térmicos que propiciem microestruturas com maior resistência, apresentam normalmente, maior dureza e com isso, após a usinagem, por quebrarem mais o cavaco, um grau de acabamento melhor em relação a materiais mais dúcteis, tipicamente, matrizes microestruturais compostas por frações ferríticas-perlíticas.

Figura 2.8 Fatores de influência na rugosidade de uma superfície usinada.



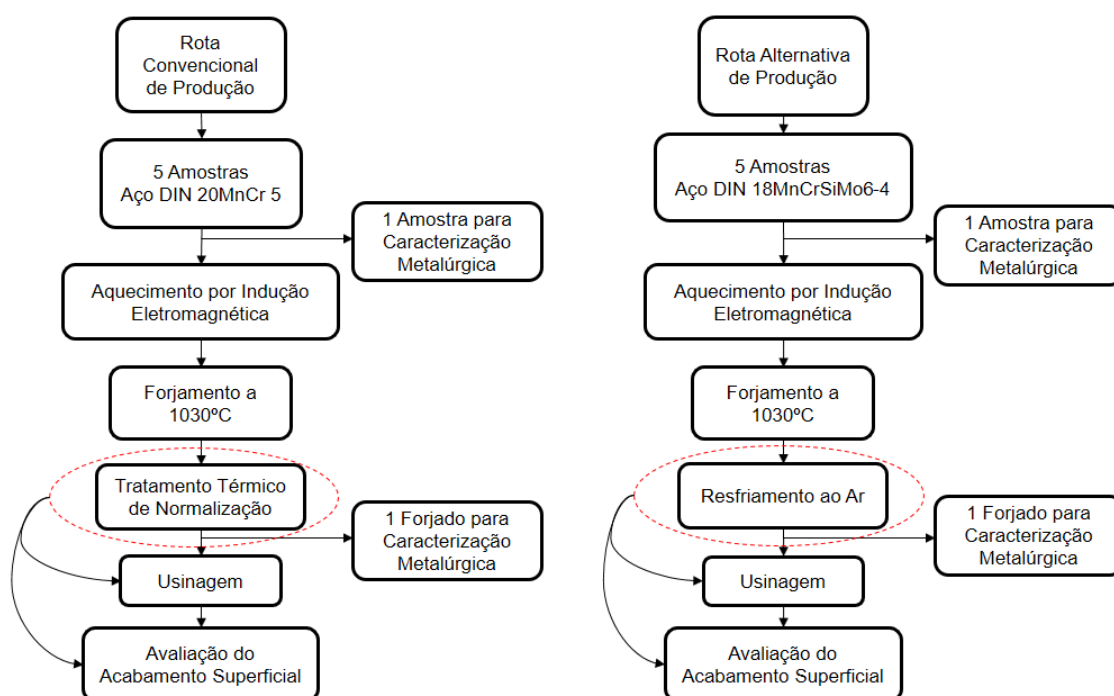
Fonte: adaptado de BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003.

Sendo importante salientar que o valor Ra encontrado em uma varredura, representa a média da rugosidade, podendo haver picos ou vales proeminentes que não sejam evidenciados em uma medição, dado que a média se mantenha inalterada. Devido a este fato, optou-se também, por se utilizar o parâmetro de medida de acabamento superficial Rz, que representa por sua vez a média aritmética de cinco medidas de rugosidade parcial. Com a distância do maior pico a uma linha de referência e do maior vale, também em relação a linha de referência, no comprimento da amostragem analisada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na realização deste estudo e também o procedimento experimental adotado. A razão é permitir o entendimento das etapas até a fabricação das engrenagens propostas com os aços DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4, segundo as rotas produtivas adotadas para cada material. Na figura 3.1, é ilustrado como foi organizado toda a metodologia utilizada neste trabalho, através do fluxograma em detalhes as rotas produtivas aplicadas aos dois materiais.

Figura 3.1 Fluxograma mostrando as duas rotas produtivas.



Fonte: O autor.

3.1 Materiais

Esta seção se dedica a identificação e caracterização das matérias-primas utilizadas para este estudo. Com análise de composição química dos aços e micrografias de amostras como-recebidas.

3.1.1 Aços utilizados

A análise da composição química do material como recebido, em barras redondas laminadas de 38mm de bitola do aço DIN 18MnCrSiMo6-4, foi o princípio para o estudo comparativo com o aço DIN 20MnCr5, também relacionado com a sua forma como recebido. Primeiramente, cada amostra foi preparada mediante lixamento para planificação e remoção de possíveis contaminantes com a utilização de uma lixa de 80mesh, sendo, em seguida, analisada através de espectrometria de emissão ótica, utilizando-se um espectrômetro marca Spectro, modelo Spectrolab. O resultado expressa uma média de três análises efetuadas em cada amostra que pode ser observado através da tabela 3.1, respectivamente, aos aços DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4.

Tabela 3.1 Composições químicas e algumas propriedades mecânicas dos aços DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4 utilizados nos experimentos (% em massa).

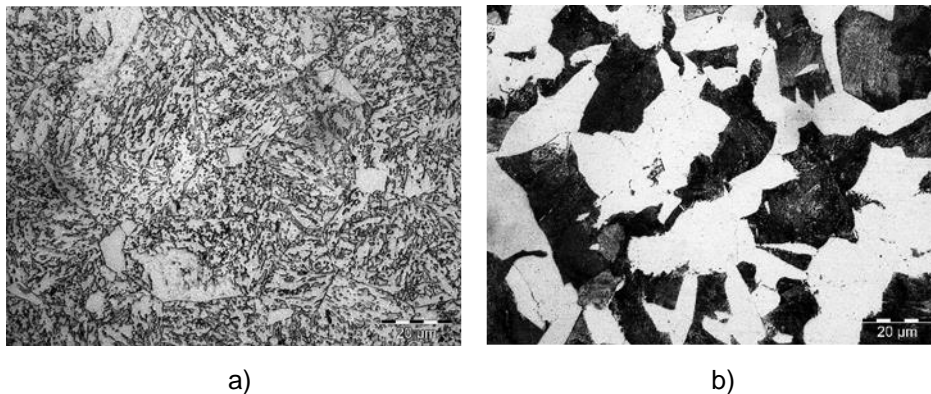
Elementos Químicos DIN 20MnCr5(% de massa)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,241	0,261	1,253	0,014	0,025	1,033	<0,01	0,036	0,064
Co	Cu	Nb	Mg	V	Ti	W	Sn	B
0,011	0,115	<0,005	<0,005	<0,005	<0,003	<0,1	-	-
Propriedades Mecânicas DIN 20MnCr5								
Tensão de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento		Dureza		
500 MPa		685 MPa		12%		180 HV		
Elementos Químicos DIN 18MnCrSiMo6-4 (% de massa)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,189	1,16	1,35	0,0097	0,0147	1,14	0,263	0,058	0,0136
Co	Cu	Nb	Mg	V	Ti	W	Sn	B
<0,01	0,09	<0,001	-	<0,001	0,002	<0,01	0,0072	0,0007
Propriedades Mecânicas DIN 18MnCrSiMo6-4								
Tensão de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento		Dureza		
825 MPa		1017 MPa		17%		330 HV		

Fonte: LdTM

3.1.2 Caracterização metalúrgica como recebido

Uma amostra microestrutural do material como recebido foi retirada de uma secção transversal de cada aço. As amostras foram preparadas para observação mediante corte transversal das barras laminadas, embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento. Para revelar a microestrutura foi utilizado Nital 2%. A observação foi feita através de microscopia ótica, utilizando-se um equipamento da marca Olympus, modelo BX 51 M, sendo que as micrografias foram obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio, os resultados são mostrados na figura 3.2.

Figura 3.2 Microestrutura dos aços como-recebido (a) DIN 18MnCrSiMo6-4 com a presença de bainita granular e microestrutura refinada; (b) DIN 20MnCr5 com a presença de ferrita pró-eutetoide e perlita.



Fonte: O autor.

3.2 Métodos

As barras laminadas dos aços, após terem sido cortadas igualmente até as dimensões do billet para o forjamento, passaram por aquecimento em forno de indução até a temperatura de forjamento de 1030°C, com temperatura capturada por termo-câmera da marca FLUKE, calibrada com emissividade ajustada para valores entre 0,80 e 0,88. Os procedimentos de forjamento são mostrados na figura 3.3.

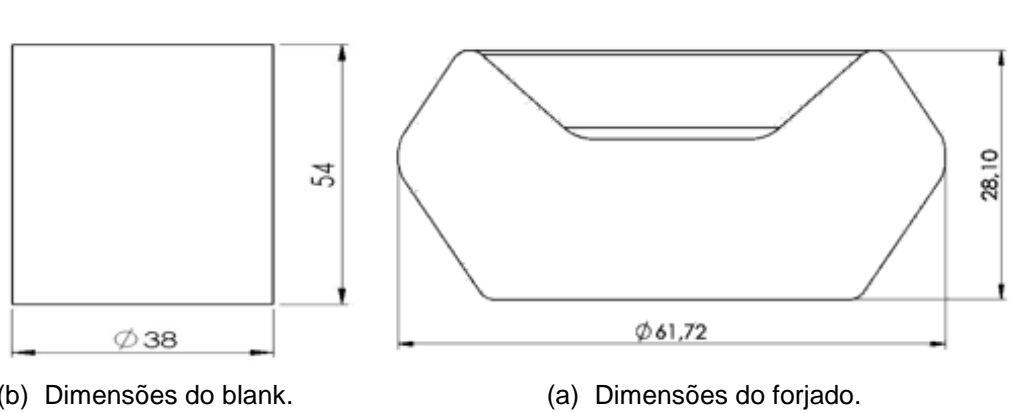
Figura 3.3 Processo de forjamento das engrenagens ilustrado pelas setas, partindo da introdução e aquecimento por indução do blank, passando para a introdução do blank na matriz de forjamento, forjamento das pré-formas das engrenagens, extração e rebarbação.



Fonte: O Autor

Após o processo de forjamento a quente, tanto as peças forjadas produzidas com o aço DIN 20MnCr5, quanto as peças produzidas com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4, foram resfriadas ao ar calmo a uma taxa de 0,5 K/s. As quatro peças produzidas com o aço DIN 20MnCr5 seguiram para o tratamento térmico de normalização em forno por batelada, a uma temperatura de 900°C, por um tempo de uma hora e meia e resfriamento posterior a temperatura ambiente, padrão conforme o tratamento térmico aplicado a este material. Sendo uma das amostras forjadas com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 retirada para caracterização metalográfica logo após o forjamento e uma amostra do aço DIN 20MnCr5 sendo retirada para caracterização metalográfica após finalizado o tratamento térmico de normalização. Todas as peças produzidas com os dois aços detinham uma massa de 0,539kg e dimensões representadas pela figura 3.4.

Figura 3.4 Peças obtidas após forjamento a quente (a) dimensões em “mm” do blank; (b) dimensões do forjado.

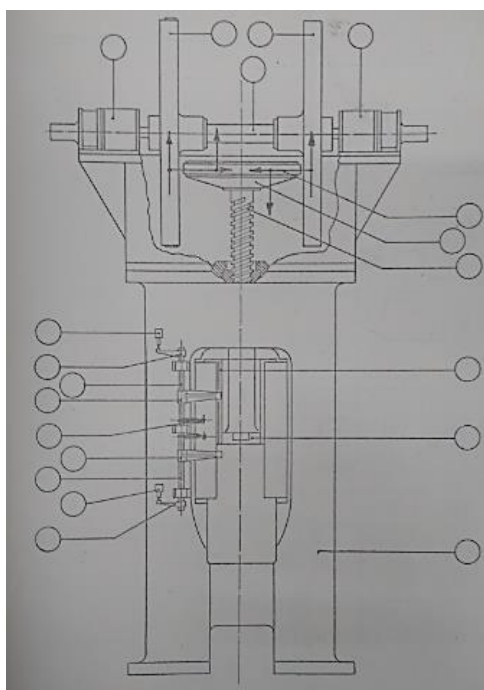


Fonte: O Autor

3.2.1 Equipamento de conformação

O equipamento empregado para o forjamento a quente foi uma prensa de fricção FISAME, com capacidade de 400tnf em uma única etapa de conformação para os dois tipos de aço, quatro pré-formas para as engrenagens com o aço DIN 20MnCr5 e quatro pré-formas para o aço DIN 18MnCrSiMo6-4. Pode-se melhor identificar a geometria da prensa através do desenho técnico da figura 3.5.

Figura 3.5 Desenho técnico da prensa de fricção utilizada.



Fonte: O Autor

3.2.2 Máquinas operatrizes de usinagem

Para a fabricação das engrenagens foi utilizado uma célula composta por dois tornos CNC para torneamento interno, externo e furação, brochadeira vertical para produção do estriado interno e máquina geradora de dentes para fabricação das engrenagens espirais pelo método *Gleason*, conforme tabela 3.2.

Tabela 3.2 Características das máquinas, com seu ano de fabricação, modelo e país.

Máquina	Torno CNC	Brochadeira	Torno CNC	Geradora de Dentes
Marca	INDEX – Tornos Automáticos Ind. Com. Ltda. Sorocaba	BÉSTLE INDÚSTRIA	INDEX – Tornos Automáticos Ind. Com. Ltda. Sorocaba	GLEASON
Número de Série	GU 60.32.903.2	8167	GU 60.32.904.2	965004
País de Fabricação	República Federativa do Brasil	República Federativa do Brasil	República Federativa do Brasil	Estados Unidos da América
Ano de Fabricação	2007	1987	2007	2004

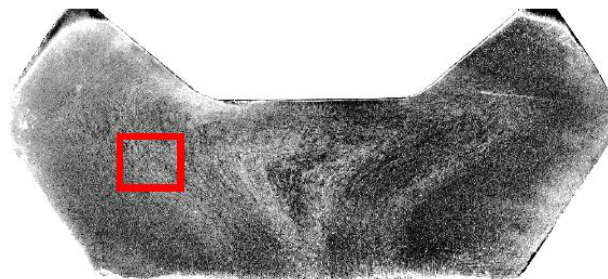
Fonte: O Autor

3.2.3 Caracterização metalúrgica do forjado

Após o forjamento, as amostras em aço DIN 20MnCr5 seguiram para o tratamento térmico de normalização em forno tipo *IPSEN*. Uma amostra em DIN 18MnCrSiMo6-4 seguiu para caracterização metalúrgica e posteriormente, uma amostra de DIN 20MnCr5 também seguiu da mesma forma para análise metalúrgica após o tratamento térmico de normalização.

A caracterização metalúrgica foi baseada em metalografia e ensaio de microdureza *Vickers* (HV). Na metalografia, optou-se por se analisar a região onde se gerariam os dentes da engrenagem, como mostrado na figura 3.6. Utilizou-se o procedimento padrão de preparação metalográfica, com o lixamento até lixa 1000 mesh, seguido de polimento com alumina a 3 μ m e ataque nital 5% em cada amostra analisada. As imagens foram captadas utilizando um microscópio óptico Olympus modelo BX51M.

Figura 3.6 Macrografia de um dos forjados utilizados no estudo com a região da caracterização metalúrgica.



Fonte: O Autor

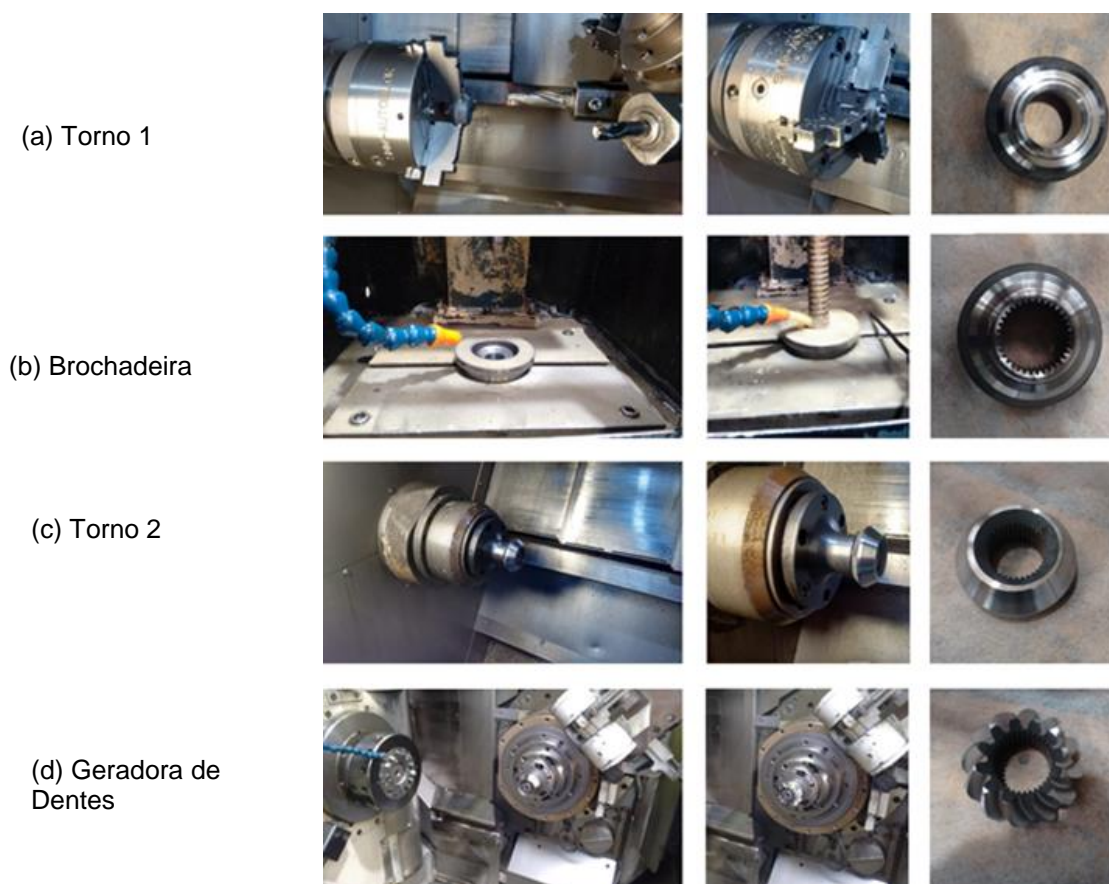
3.2.4 Usinagem das engrenagens

As amostras restantes após a caracterização metalúrgica do forjado, três com o aço DIN 20MnCr5 e três com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4, seguiram para a usinagem. Sendo realizada sem haver refrigeração em todas as operações para avaliação dos cavacos que seriam gerados. A primeira operação foi realizada em torno CNC, com a furação, torneamento externo de desbaste e acabamento na face superior das engrenagens e torneamento interno de acabamento. A segunda operação foi realizada em uma brochadeira vertical para produção do estriado interno. A terceira operação de usinagem foi realizada em outro torno CNC com

torneamento externo de desbaste da face oposta. Passando por fim até a última operação de usinagem com a geração dos dentes das engrenagens pelo método *Gleason*, conforme figura 3.7.

A usinagem foi iniciada com amostras do aço DIN 20MnCr5 com o recolhimento dos cavacos formados em cada uma das operações de usinagem citadas, posteriormente, limpou-se as máquinas e usinou-se as amostras forjadas do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 com o respectivo recolhimento dos cavacos formados em cada operação, com o mesmo procedimento adotado com as amostras de DIN 20MnCr5.

Figura 3.7 Operações de usinagem na fabricação das engrenagens (a) Torno 1; (b) Brochadeira; (c) Torno 2; (d) Geradora de dentes.



Fonte: O Autor.

Para a usinagem das amostras de DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4 foram utilizados os mesmos parâmetros de ferramenta, velocidade de avanço e rotação nas máquinas operatrizes empregadas, como mostrado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Parâmetros das máquinas operatrizes utilizados na fabricação das engrenagens.

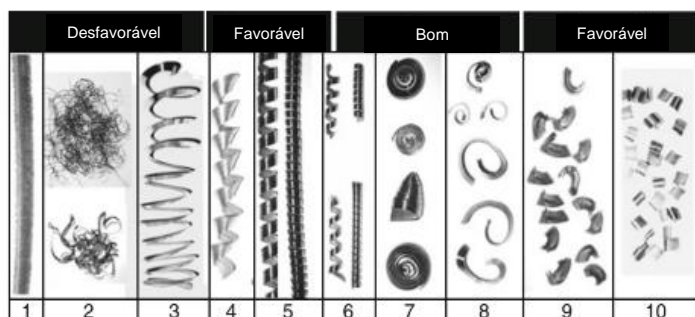
Torno 1				
Ferramenta	Parâmetros F= Avanço (m/min) e S= Rotação (RPM)			
Broca TMAX Ø26	F= 0.1	S=2000 RPM		
Ferramenta Desbaste WNGM	F= 0.20	S=230 Aproximadamente 2000 RPM		
Ferramenta Acab. Ext. DNMG	F=0.30	S=150 Aproximadamente 1333 RPM		
Ferramenta Acab. Int. CCMT	F=0.15	S=160 Aproximadamente 1924 RPM		
Brochadeira				
Ferramenta	F= 0.8	Brocha 26x30		
Torno 2				
Ferramenta	Parâmetros (F= Avanço e S= Rotação)			
Ferramenta Desbaste WNGM	F= 0.20	S=230 Aproximadamente 2000 RPM		
Ferramenta Acab. Ext. DNMG	F=0.30	S=150 Aproximadamente 1333 RPM		
Geradora de Dentes				
Ferramenta	550RPC			
Pentac	Avanço 1	Avanço 2	Avanço 3	Avanço 4
	0,08	0,06	0,04	0,02

Fonte: O Autor.

3.2.5 Caracterização do formato dos cavacos

Para a avaliação da forma dos cavacos foi utilizada uma câmera fotográfica digital, marca *CANON*, modelo *SX170*. Com um registro fotográfico por cavaco em vista topo, a 200mm de distância em superfície horizontal plana e sob luz ambiente, sem magnificação. Todas as amostras foram comparadas com base na figura para que melhor pudessem ser caracterizadas. É possível se observar como foi feita avaliação comparativa através da figura 3.8.

Figura 3.8 Forma de caracterização da forma dos cavacos exemplificada.



- | | |
|----------------------------|--------------------------------|
| 1 Cavaco em fita | 6 Cavaco em segmento de hélice |
| 2 Cavaco emaranhado | 7 Cavaco cilíndrico em hélice |
| 3 Cavaco em hélice plano | 8 Cavaco espiral |
| 4 Cavaco angular em hélice | 9 Cavaco de seguimento espiral |
| 5 Cavaco em hélice | 10 Cavaco descontínuo |



10 - Cavaco Descontínuo

Fonte: Adaptado de KLOCKE, 2010.

3.2.6 Avaliação do acabamento superficial

Para a avaliação do acabamento superficial Ra e Rz das amostras usinadas, utilizou-se rugosímetro, marca *Mitutoyo*, modelo SJ-210. Com raio de ponteira de $8\mu\text{m}$, deslocamento de 5mm a uma velocidade de varredura de 0,25mm/s. Realizou-se a medição das engrenagens produzidas em três posições diferentes, denotadas por “a”, “b” e “c”, conforme figura 3.9. Primeiramente, mediu-se as três engrenagens em DIN 20MnCr5 com medição realizada três vezes em cada uma das três posições “a”, “b” e “c”, calculando-se então as médias e os desvios obtidos. O mesmo procedimento foi empregado ao DIN 18MnCrSiMo6-4.

Figura 3.9 Posições de medição (a) Flanco de dente; (b) Topo de dente; (c) Face oposta.



a)



b)



c)

Fonte: O Autor.

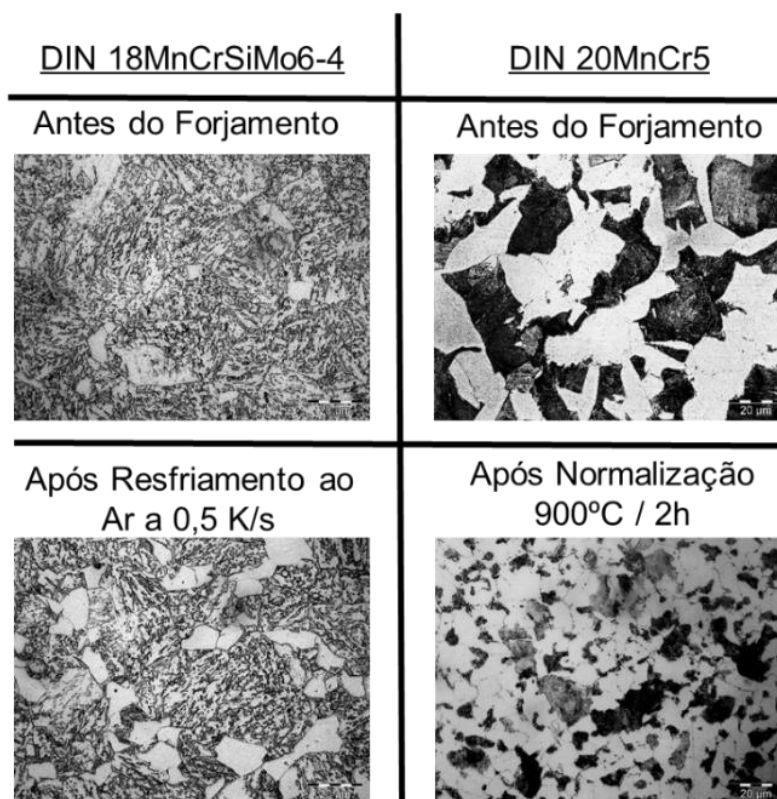
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise microestrutural após forjamento e tratamento térmico

Os resultados obtidos podem ser observados pelas duas micrografias na figura 4.1, com a formação de menores pacotes de perlita na matriz ferrítica. Observa-se na amostra do aço DIN 20MnCr5 não ter apresentado grandes alterações microestruturais que a esperada para esta classe de material, com a formação de ferrita pró-eutetoide e perlita, tanto na condição como recebido, quanto na condição após o forjamento e o tratamento térmico de normalização. O que se observa, entretanto, é uma estrutura mais refinada após a normalização para a amostra analisada em relação a como recebida.

Nota-se no aço DIN 18MnCrSiMo6-4 resfriado ao ar, a formação de uma microestrutura comparável a atingida por outros estudos citados na introdução deste trabalho, com a presença de microconstituintes semelhantes proporcionalmente a secção resfriada de 55mm de diâmetro, como mostrado por ROELOFS, 2014. Uma microestrutura mais grosseira em relação à condição de como recebida foi obtida, o que reforça a teoria naquele estudo para diâmetros maiores ou em secções maiores, a composição química e as taxas de resfriamento são fatores de importância mais significativa para o atingimento de uma microestrutura mais refinada e homogênea. O aço DIN 18MnCrSiMo6-4 obtido no resfriamento após o forjamento a quente tem as características de formação de uma bainita granular como apontado no trabalho de HASLER, 2011.

Figura 4.1 Comparativo entre as amostras de aço antes do forjamento e após os tratamentos térmicos aplicados aos aços DIN 18MnCrSiMo6-4 e DIN 20MnCr5.



Fonte: O Autor.

A dureza de cada peça forjada foi realizada e registrada conforme pode ser observado na tabela 4.1. Sendo relacionado às situações como recebido e após o resfriamento contínuo do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 e após a normalização do aço DIN 20MnCr5 com sua condição de como recebido antes do forjamento. Observa-se a maior dureza obtida pelo resfriamento controlado com o aço bainítico em relação ao aço ferrítico-perlítico, devido à formação de bainita e a maior complexidade microestrutural de diferentes frações de microconstituintes obtidos.

Tabela 4.1 Durezas obtidas nas amostras antes do forjamento e após os tratamentos térmicos aplicados aos dois materiais.

Condição	DIN 18MnCrSiMo6-4	DIN 20MnCr5
Como recebido antes do forjamento	330HV	180HV
Resfriamento aplicado	350HV (Ar)	210HV (Normalização)

Fonte: O autor.

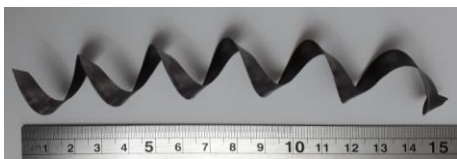
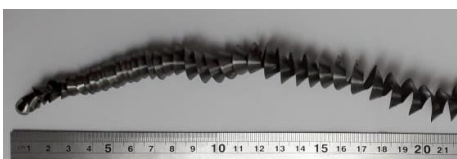
Pode-se perceber pelas durezas, que a amostra de DIN 18MnCrSiMo6-4 mostrou ter tido um aumento de dureza de 330HV para 350HV na região de análise escolhida no forjado. O mesmo foi observado para a amostra de DIN 20MnCr5 com relação ao aumento de dureza observada, passando de 180HV na condição anterior ao forjamento para 210HV após o tratamento térmico de normalização aplicado.


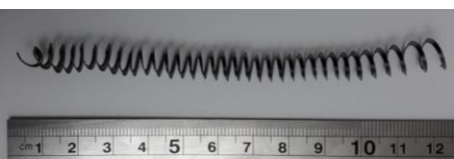


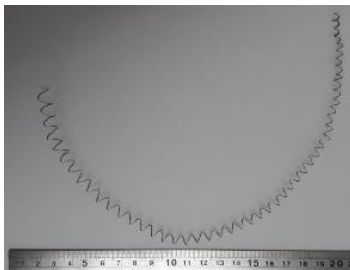
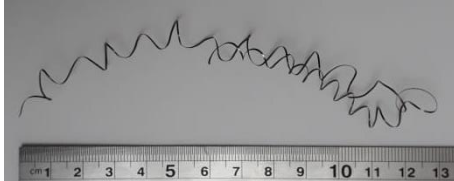

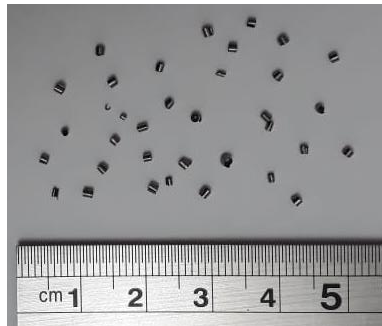
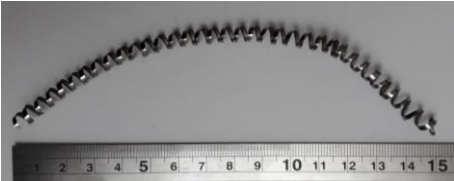

4.2 Formato dos cavacos obtidos

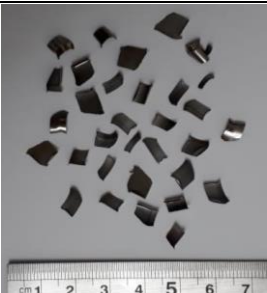

Os comparativos das formas dos cavacos coletados e registrados após cada operação de usinagem, com base nas máquinas empregadas estão contempladas na tabela 4.2.

As imagens dos cavacos formados pelos dois materiais em cada operação de usinagem mostram proximidade quanto a forma pela qual se separam do material até a ruptura final com a formação do cavaco. Observa-se na operação de furação a formação de cavaco em hélice plano para as amostras em aço DIN 20MnCr5 e cavaco angular em hélice para as amostras em DIN 18MnCrSiMo6-4. Nas operações de torneamento ocorrem, entretanto, as mesmas formas de cavaco formado com cavacos em hélice plano e emaranhado para ambos os materiais. No brochamento e na geração de dentes das engrenagens houve semelhança na formação dos cavacos para os dois aços, com a formação de cavacos tipo hélice e descontínuo, respectivamente.

Tabela 4.2 Resultados das formas obtidas pelos dois aços, com base comparativa dada pela tabela da referência da literatura, utilizando as mesmas máquinas operatrizes, as mesmas ferramentas e os mesmos parâmetros de corte na usinagem das engrenagens em aço DIN 20MnCr5 e em aço DIN 18MnCrSiMo6-4.

Operação	DIN 20MnCr5	DIN 18MnCrSiMo6-4
Torno 1 - Furação	 <p>3 Cavaco em hélice plano</p>	 <p>4 Cavaco angular em hélice</p>

<p>Torno 1 – Torneamento Externo de Desbaste</p>	 <p>3 Cavaco em hélice plano</p>	 <p>3 Cavaco em hélice plano</p>
<p>Torno 1 – Torneamento Externo de Acabamento</p>	 <p>2 Cavaco emaranhado</p>	 <p>2 Cavaco emaranhado</p>
<p>Torno 1 – Torneamento Interno de Acabamento</p>	 <p>3 Cavaco em hélice plano</p>	 <p>3 Cavaco em hélice plano</p>
<p>Brochadeira Vertical – Brochamento Interno</p>	 <p>9 Cavaco de seguimento</p>	 <p>9 Cavaco de seguimento</p>
<p>Torno 2 - Torneamento Externo de Desbaste</p>	 <p>5 Cavaco em hélice</p>	 <p>5 Cavaco em hélice</p>

<p>Geradora de Dentes - Corte dos Dentes da Engrenagem</p>	 <p>10 Cavaco descontínuo</p>	 <p>10 Cavaco descontínuo</p>
--	--	--

Fonte: O Autor.

Observa-se grande semelhança de todos os cavacos formados em relação as formas obtidas após cada operação de usinagem pelos registros fotográficos feitos, comparativamente ao apresentado por KLOCKE (2010), tanto para o aço DIN 20MnCr5, quanto para o aço DIN 18MnCrSiMo6-4. Sendo um indicativo da boa usinabilidade do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 com os mesmos parâmetros de corte utilizados nas operações de usinagem do aço DIN 20MnCr5, mesmo que o aço DIN18MnCrSiMo6-4 apresente uma maior dureza.

Muito da proximidade na forma dos cavacos obtidos entre os dois aços deve-se ao estado microestrutural dos dois materiais após as rotas produtivas. O primeiro fator a ser utilizado como explicação é a composição química com um baixo teor de carbono, que já propicia menores esforços de usinagem, segundo KLOCKE. A ausência de carbonetos de alta dureza precipitados na matriz que viessem a causar maiores esforços de usinagem e deformação por encruamento até a ruptura final por cisalhamento do cavaco foi outro fator preponderante para se ter tido o desempenho assemelhado.

Outro ponto relevante, que deve ser ressaltado ao se analisar o modo geral dos cavacos observados entre os dois materiais, é que mesmo geometricamente próximos, os cavacos de DIN 18MnCrSiMo6-4 apresentaram ter a tendência, comparativamente, de serem menores em relação aos cavacos gerados com a usinagem do aço DIN 20MnCr5 na fabricação das engrenagens propostas. Uma das possibilidades a explicar esta menor dimensão visual pode ser inferida pelas características adquiridas pelos aços bainíticos após o resfriamento, com o pequeno tamanho de grão e a microestrutura notadamente mais refinada. Permitindo haver

uma melhor condição de usinagem, com a combinação de maior dureza dos aços bainíticos que propicia mais fácil quebra do cavaco nas operações de usinagem.

4.3 Avaliação do acabamento superficial

O acabamento superficial obtido nas três posições do aço DIN 20MnCr5 avaliado com os parâmetros de rugosidade superficial Ra e Rz são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Valores de rugosidade Ra e Rz e seus desvios estatísticos obtidos pelas medições das engrenagens fabricadas com o aço DIN 20MnCr5 (a) Medição Paralela ao Flanco do Dente; (b) Medição Perpendicular ao Topo do Dente; (c) Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem.

Posição de Medição	Peça 1		Peça 2		Peça 3	
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
Medição Paralela ao Flanco do Dente (a)	6,543	1,32	7,103	1,231	6,897	1,783
	6,278	1,886	6,523	1,314	7,283	1,146
	6,725	1,548	7,873	1,549	7,592	1,054
Média por Peça	6,515	1,585	7,166	1,365	7,257	1,328
Desvio	0,225	0,285	0,677	0,165	0,348	0,397
Média Geral Ra	1,384		Desvio Geral Ra		1,426	
Média Geral Rz	7,397		Desvio Geral Rz		0,417	
Medição Perpendicular ao Topo do Dente (b)	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
	17,423	3,795	16,385	3,123	15,409	3,297
	16,817	3,384	16,393	3,198	16,084	3,93
Média	16,721	3,61	17,522	3,471	16,32	3,87
	16,987	3,596	16,767	3,264	15,938	3,699
Desvio	0,381	0,206	0,654	0,183	0,473	0,349
Média Geral Ra	3,520		Desvio Geral Ra		0,246	
Média Geral Rz	16,564		Desvio Geral Rz		0,503	
Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem (c)	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
	9,032	1,805	7,724	1,459	6,916	1,118
	8,782	1,845	7,912	1,683	8,59	1,836
Média	8,845	1,678	8,038	1,972	7,522	1,425
	8,886	1,776	7,891	1,705	7,676	1,460
Desvio	0,130	0,087	0,158	0,257	0,848	0,360
Média Geral Ra	0,235		Desvio Geral Ra		0,235	
Média Geral Rz	8,151		Desvio Geral Rz		0,379	

Fonte: o Autor.

A qualidade da rugosidade superficial resultante das engrenagens com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 podem ser encontrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Valores de rugosidade Ra e Rz e seus desvios estatísticos obtidos pelas medições das engrenagens fabricadas com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 (a) Medição Paralela ao Flanco do Dente; (b) Medição Perpendicular ao Topo do Dente; (c) Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem.

Posição de Medição	Peça 1		Peça 2		Peça 3	
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
Medição Paralela ao Flanco do Dente (a)	6,887	1,27	6,936	1,188	7,589	1,56
	7,606	1,243	6,342	1,226	5,701	1,061
	7,411	1,296	7,727	1,314	7,837	1,483
Média por Peça	7,301	1,270	7,002	1,243	7,042	1,368
Desvio	0,372	0,027	0,695	0,065	1,168	0,269
Média Geral Ra	1,364		Desvio Geral Ra		1,293	
Média Geral Rz	7,658		Desvio Geral Rz		0,745	
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
Medição Perpendicular ao Topo do Dente (b)	15,77	3,541	15,798	3,613	16,42	3,453
	15,568	3,632	16,209	3,389	16,544	3,855
	16,767	3,692	15,329	3,641	17,341	3,671
Média	16,035	3,622	15,779	3,548	16,768	3,660
Desvio	0,642	0,076	0,440	0,138	0,500	0,201
Média Geral Ra	3,61		Desvio Geral Ra		0,138	
Média Geral Rz	16,194		Desvio Geral Rz		0,527	
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem (c)	8,462	1,902	6,776	6,067	1,329	1,118
	8,414	1,842	7,747	8,353	1,787	1,836
	7,288	1,439	8,845	7,126	1,380	1,425
Média	8,055	1,728	7,789	7,182	1,499	1,46
Desvio	0,664	0,252	1,035	1,144	0,251	0,36
Média Geral Ra	0,259		Desvio Geral Ra		0,259	
Média Geral Rz	7,675		Desvio Geral Rz		0,948	

Fonte: O Autor.

O comparativo das médias de Ra e Rz dos dois aços é mostrado na tabela 4.5 sendo possível inferir que a ambos os materiais, a rugosidade que representa o grau de acabamento final das peças obtidas com as engrenagens fabricadas em DIN 20MnCr5 e em DIN 18MnCrSiMo6-4 foi próximo.

Tabela 4.5 Comparativo entre as rugosidades médias gerais de Ra e Rz, com seus respectivos desvios estatísticos, em relação a posição de medição e aos aços utilizados.

Posição	Aço	Média Geral Ra	Desvio Ra	Média Geral Rz	Desvio Rz
Medição Paralela ao Flanco do Dente (a)	DIN 20MnCr5	1,384	1,426	7,397	0,417
	DIN 18MnCrSiMo6-4	1,364	1,293	7,658	0,745
Medição Perpendicular ao Topo do Dente (b)	DIN 20MnCr5	3,52	0,246	16,564	0,503
	DIN 18MnCrSiMo6-4	3,61	0,138	16,194	0,527
Medição Tangente à Face Inferior da Engrenagem (c)	DIN 20MnCr5	0,235	0,235	8,151	0,379
	DIN 18MnCrSiMo6-4	0,259	0,259	7,675	0,948

Fonte: O Autor.

Os valores de Ra e Rz mensurados nas três posições de medição reforçam a ideia exposta na discussão dos resultados em relação as microestruturas dos dois aços e a forma dos cavacos obtidos nas operações de usinagem. Mostram que, quantitativamente, para os mesmos parâmetros de usinagem, os cavacos formados são praticamente iguais e o acabamento das diferentes superfícies usinadas são muito próximas.

A média geral Ra observada na medição paralela ao flanco de dente para as engrenagens em DIN 20MnCr5 e DIN 18MnCrSiMo6-4 possuem diferença a partir da terceira casa após a vírgula, com um desvio padrão menor que dois. Já para os valores de média geral Rz observada, a diferença entre os dois aços é perceptível a partir já da primeira casa decimal.

Nas medições da média geral Ra na posição perpendicular ao topo do dente, tem-se uma diferença muito pequena, não ultrapassando de 1 pt Ra entre as engrenagens produzidas com os dois tipos de aços. Observa-se valores de Rz maiores, entretanto, quando comparados nesta mesma posição.

Na medida realizada tangente à face inferior da engrenagem, vê-se valores de médias gerais de Ra se destoando na segunda casa decimal. O que representa, em termos de rugosidade, valores dentro de um mesmo grau de acabamento obtido.

5 CONCLUSÕES

O aço DIN 18MnCrSiMo6-4 se mostrou um material satisfatório para a fabricação de engrenagens cônicas espirais, mesmo aplicando-se outra rota produtiva de fabricação com resfriamento ao ar após o forjamento a quente. Não tendo sido observadas alterações significativas quanto ao formato dos cavacos formados, nas operações de usinagem ou no acabamento final mensurado pela rugosidade, em relação ao aço DIN 20MnCr5.

A microestrutura bainítica obtida com o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 pode ser considerada uma microestrutura válida para se suprimir o tratamento térmico de normalização após forjamento a quente, uma vez que se permite obter propriedades mecânicas adequadas com o resfriamento ao ar.

Pode-se atingir um grau de acabamento superficial com as engrenagens em aço DIN 18MnCrSiMo6-4, tão bem qualificado quanto o alcançado nas engrenagens fabricadas em aço DIN 20MnCr5. Com base nos mesmos parâmetros de corte, nas operações de usinagem descritas e realizadas, com as mesmas ferramentas utilizadas e com as mesmas máquinas operatrizes na fabricação das engrenagens.

Pode-se concluir que as propriedades mecânicas superiores do aço bainítico podem ser explorados para a produção de engrenagens, sem prejuízo do processo de usinagem executado após o forjamento. Este pode ser um ponto culminante para este tipo de aço na indústria brasileira como um meio inovador para aumentar a sua competitividade mundial.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o impacto de diferentes temperaturas de forjamento e de diferentes taxas de resfriamento na microestrutura obtida no aço DIN 18MnCrSiMo6-4 na produção de componentes de diferentes geometrias e complexidades. Visando-se parametrizar as melhores propriedades mecânicas possíveis de serem atingidas.

Realizar estudo que avalie a usinabilidade do aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4, através da análise do desgaste das ferramentas de usinagem de geometria definida, com diferentes parâmetros de corte. Podendo-se avaliar o uso de lubrificantes e sua influência.

Avaliar a resistência ao desgaste por teste de fadiga em engrenagens produzidas com o aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4, de modo a se obter dados empíricos mais robustos para projetos de engenharia futuros e uma maior vida útil na aplicação deste tipo de componentes. Aplicando-se tratamentos termoquímicos especiais de revestimento, como nitretação.

7 CUSTOS DO TRABALHO

Os custos de produção deste trabalho são expostos na tabela 7.1, sendo possível se observar os custos por demanda de matéria-prima, mão-de-obra, serviços e equipamentos utilizados.

Tabela 7.1 Custos de produção do trabalho por demanda.

Item	Custo total
Materia-prima	R\$ 800,00
Mão de obra	R\$ 1.800,00
Equipamentos	R\$ 1900,00
Serviço	R\$ 1200,00
Total	R\$ 5.700,00

Fonte: O Autor.

8 REFERÊNCIAS

NORTON, L. R. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. Trad. de João Batista de Aguiar et al. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHIGLEY J.; MISCHE Charles. Projeto de Engenharia Mecânica 7ª ed. Bookman, 2005.

RAKHIT, A. K., “Heat Treatment of Gears – A Practical Guide for Engineers”, ASM International, dezembro de 2000.

ASM Metals Handbook, Volume 4: Heat Treating, ASM International.

BHADESHIA, H. K. D. H.. ‘Bainite in steels’, 2edn, 2001, London, Institute of Materials.

HASLER, S.; ROELOFS, H.; LEMBKE, M.; CABALLERO, F. G. New air cooled steels with outstanding impact toughness, 3rd Int Conf. On Steels in Cars and Trucks, Salzburg, 5-9 June 2011.

ROELOFS, H.; URLAU, U.; LEMBKE, M.; OLSCHESKI, G. New bright bar multiphase steels with excellent machinability, 2nd Int Conf. On Steels in Cars and Trucks, Wiesbaden, Germany, 1-5 June 2008.

BUCHMAYR, B. Critical Assessment 22: bainitic forging steels, Materials Science and Technology, 32:6, p. 517-522, 2016.

ROELOFS, H.; HASLER, St.; URLAU, U.; LEMBKE, M.I.; OLSCHESKI, G. Continuously cooled bainitic steel HSX®Z12: one decade of experience, 4th Int Conf. On Steels in Cars and Trucks, Wiesbaden, Germany, 15-19 June 2014.

COSTA E SILVA A. L. V.; Mei P. R., Aços e Ligas Especiais, Editora Edgard Blücher, 2ª edição, 2006, p. 399 – 411.

DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica, 2ª. edição. Editora Guanabara Dois, 1981.

NORMA DIN 8580 - **DIN - Fertigungsverfahren**. Berlin: Beuth Verlag, 1985.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, v. p. 1-751, 1986.

NORMA ABNT NBR 6175 - “Usinagem - Processos mecânicos”, Editora ABNT, 2015.

HADDAD, F.; LESCALIER, C.; DESAIGUES, J. E.; ARZUR, A. B.; BOMMONT, O. Metallurgical analysis of chip forming process when machining high strength bainitic steels. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 3. 10. 2019.

SMOLENICKI, D.; BOOS, J.; KUSTER, F.; WEGENER, K. Analysis of the chip formation of bainitic steel in drilling processes. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting. 1. p. 683-684. 2012

KLOCKE, F.; KUCHLE, A. **Manufacturing Processes 1 Cutting**, p. 39-53, 2013 Springer Berlin, Germany. RWTH edition.

BIERMANN, D.; HARTMANN, H.; TERWEY, I.; MERKEL, C.; KEHL, D. Turning of High-Strength Bainitic and Quenched and Tempered Steels. *Procedia CIRP*, 7, p. 276-281, 2013.

HARTMANN, H.; BIERMANN, D.; Enginner, S.; MERKEL, C. Investigations on machining of high strength bainitic steels. In *Proceedings of the Future Trends in Steel Development, Processing Technologies and Applications*, Braunschweig, Germany, 15-19 June 2014; pp. 149-156.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR – ISO 4287/2002 – **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. ABNT, 2002.

BENARDOS P.G., VOSNIAKOS G.C., “Predicting surface roughness in machining: a review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.43, pp. 833–844, 2003.