

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CRISTIANE ARENDT

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS DE
CORTE NO TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Jaraguá do Sul

24 de julho de 2017

CRISTIANE ARENDT

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS DE
CORTE NO TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Monografia apresentada ao Curso de
Tecnologia em Fabricação Mecânica do
Campus Rau do Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do diploma de
Tecnólogo em Fabricação Mecânica

Orientador: Stélio Jacomo Storti, Me.

Jaraguá do Sul

24 de julho de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Arendt, Cristiane
Análise do comportamento de desgaste de ferramentas
de corte no torneamento de ferro fundido nodular austemperado
/ Cristiane Arendt ; orientação de Stélio Jacomo
Storti; coorientação de Wilmar Mattes. - Jaraguá
do Sul, SC, 2017.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

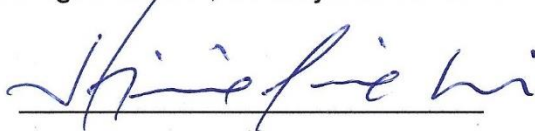
1. Usinagem. 2. ADI. 3. Rugosidade. I. Storti, Stélio
Jacomo . II. Mattes, Wilmar. III. Instituto Federal
de Santa Catarina. . IV. Título.

CRISTIANE ARENDT

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS DE
CORTE NO TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do
curso Tecnólogo em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina.

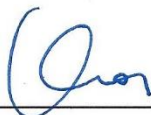
Jaraguá do Sul, 24 de julho de 2017



Prof. Stélio Jacomo Storti, Me.

Orientador

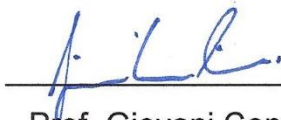
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Wilmar Mattes, Dr.

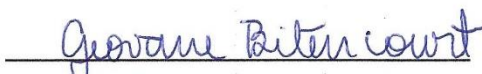
Orientador

Católica de Santa Catarina



Prof. Giovani Conrado Carlini

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Geovane Bitencourt

Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho: Ao meu esposo Gabriel, ao meu filho Miguel, a todas as pessoas que estiveram de alguma forma presentes comigo nessa jornada e especialmente a Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e inteligência.

Ao meu esposo, pela compreensão e pelo incentivo.

Ao professor orientador Stélio Jacomo Storti, por compartilhar seus conhecimentos e ensinamentos.

Ao professor coorientador Wilmar Mattes, pela confiança, estímulo e competente orientação.

Ao professor Giovani Carlini, que participou ativamente na realização dos experimentos.

À professora Miriam Hennig, pela presteza e orientações para a realização deste trabalho.

Aos colegas de turma, que ensinaram a valorizar a convivência em grupo e de amizade ao longo dos três anos e meio de convivência.

A todos os professores que compartilharam experiências com o grupo e que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

A toda a equipe de apoio do IF-SC Jaraguá do Sul – Campus Rau, que me deu suporte, sempre com cordialidade, simpatia e profissionalismo.

Muito obrigado!

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

RESUMO

A usinagem do ferro fundido nodular austemperado (ADI) ainda é pouco difundida em escala industrial, apesar de apresentar estudos e resultados que mostram que o processo é bastante vantajoso. O processo de usinagem do ADI tem limitações em termos: por ser um material dúctil o desgaste da ferramenta é maior, reduzindo rapidamente a vida da ferramenta. Esse material apresenta ótimas propriedades mecânicas e ainda é um material reciclável, sendo utilizado em vários setores industriais, podendo até substituir materiais que agredem o meio ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento apresentado na usinagem do ADI, comparando resultados obtidos com diferentes parâmetros, mas tendo como referência um bom acabamento de superfície (rugosidade) e um menor desgaste do flanco da ferramenta. Para os ensaios foram utilizados como corpo de prova ADI (40 - 45 HRc). Neste trabalho, foi avaliado o desempenho do revestimento TiAlN e TiN, utilizando insertos de desbaste e acabamento com apenas um parâmetro de velocidade de corte ($V_c = 80\text{m/min}$), com dois tipos de avanço ($f = 0,1\text{mm}$; $f = 0,15\text{mm}$) e com aplicação de fluido de corte. As variáveis de rendimento analisadas foram o desgaste de flanco máximo, qualidade dimensional e a qualidade superficial. Os melhores resultados foram obtidos utilizando avanço $f = 0,1\text{ mm}$ com cobertura de TiAlN, onde essa combinação de parâmetros e cobertura demonstrou menor desgaste de flanco, melhor qualidade dimensional e superficial.

Palavras-chave: usinagem, ADI, rugosidade.

ABSTRACT

The machining of the austempered nodular cast iron (ADI) has limitations in terms of: the wear of the tool, being a ductile material reducing the life of the tool. This material presents excellent mechanical properties and is still a recyclable material, being used in several industrial sectors, and may even substitute materials that attack the environment. The main objective of this work was to evaluate the behavior of ADI machining, comparing results obtained with different parameters, but having as a reference a good surface finish (roughness) and less wear of the tool flank. For the assays, ADI test specimen (40-45 HRc) were used. In this work, the TiAlN and TiN coating performance was evaluated using roughing and finishing inserts with only one cutting speed parameter ($V_c = 80\text{m} / \text{min}$), with two types of feed ($f = 0,1\text{mm}$, $f = 0,15\text{mm}$) and with application of cutting fluid. The performance variables analyzed were maximum flank wear, dimensional quality and surface quality. The best results were with $f = 0,1\text{mm}$ with TiAlN coverage for the parameters of lower flank wear, better surface and dimensional quality.

Key words: machining, ADI, roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de ADI, de acordo com dados da DAIMLERCHRYSLER.	19
Figura 2 - Resistência mecânica à tração versus alongamento em função da matriz do ADI	20
Figura 3 - Exemplos de peças: (a) engrenagem em ADI, (b) coroa e pinhão e (c) virabrequim de motor turbo	22
Figura 4 - Peças de máquinas agrícolas, suspensão de trator	23
Figura 5 - Principais formatos dos insertos	28
Figura 6 - Principais propriedades das coberturas	31
Figura 7 - Conceitos básicos na avaliação de superfícies	32
Figura 8 - Curva tensão - deformação de engenharia.	34
Figura 9 – Esquema de impressão de calota dureza Brinell	35
Figura 10 – Insertos utilizados para desbaste e acabamento	41
Figura 11 - Máquina utilizada para o desbaste dos ensaios de torneamento	42
Figura 12 - Máquina utilizada para os ensaios de torneamento	43
Figura 13 - Rugosímetro	43
Figura 14– Máquina Universal de Ensaios EMIC	44
Figura 15 – Durômetro de bancada	45
Figura 16 – Microscópio ÓPTICO Olympus GX-51	46
Figura 17 – Estereoscópio Zeiss Stemi 2000-C	47
Figura 18 - Corpo de prova bruto e com furos de centro	48
Figura 19 - Corpo de prova fixada ao torno com arrastador	48
Figura 20 - Corpo de prova parcialmente desbastado	49
Figura 21 - Corpo de prova parcialmente desbastado	49
Figura 22 - Corpo de prova totalmente desbastado	49
Figura 23 - Corpo de prova usinado no experimento	50
Figura 24 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço situação 01	50
Figura 25 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço situação 02	51
Figura 26 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço/cobertura	51
Figura 27 - Gráfico Tensão X Deformação	52
Figura 28 - Classificação quanto a formas da grafita	54

Figura 29 - Vista microscópica do ferro fundido nodular austemperado sem ataque.	55
Figura 30 - Microestruturas de amostras austemperadas 1000X	55
Figura 31 - Microestruturas de amostras austemperadas 500X	56
Figura 32 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 01	56
Figura 33 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 01	57
Figura 34 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 02	58
Figura 35 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 - f = 0,15mm	58
Figura 36 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 - f = 0,10mm	59
Figura 37 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 02	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator N	36
Tabela 2 – Diâmetros de esfera mais utilizados	36
Tabela 3 - Composição química definida em porcentagem para estudo no presente trabalho.	40
Tabela 4 – Propriedades calculadas para os corpos de prova	52
Tabela 5 - Tipos de ADI segundo especificação ASTM-A897-90	53
Tabela 6– Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 01	57
Tabela 7 – Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 – $f = 0,15\text{mm}$	59
Tabela 8– Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 – $f = 0,1\text{mm}$	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Delimitação do tema	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Abordagem geral do problema	17
1.4	Objetivo geral	17
1.4.1	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Ferro fundido nodular austemperado	18
2.1.1	Características	19
2.1.2	Aplicações	21
2.2	Usinagem do ferro fundido nodular austemperado	22
2.2.1	Usinabilidade do ferro fundido nodular austemperado	23
2.2.2	Efeito da microestrutura sobre a usinabilidade	25
2.2.3	Efeitos dos elementos de liga sobre a usinabilidade	26
2.3	Usinagem em torno	27
2.4	Ferramentas usadas para torneamento de ADI	28
2.4.1	Carbonetos sintetizados	29
2.5	Revestimento	29
2.6	Qualidade superficial e dimensional	31
2.7	Ensaio de tração	32
2.8	Ensaio de dureza Brinell	35
2.9	Ensaio metalográfico	37
2.10	Fluídos de corte	38
3	MÉTODOS E MATERIAIS	39
3.1	Material	39
3.2	Ferramentas	41
3.3	Máquina – ferramenta	42
3.4	Rugosidade	43
3.5	Ensaio de tração	44
3.6	Ensaio de dureza	44
3.7	Ensaio de metalografia	45

3.8	Análise de desgaste da aresta de corte	47
4	RESULTADOS	48
4.1	Rugosidade	50
4.2	Ensaio de tração	52
4.3	Ensaio de dureza	53
4.4	Análise de micrografia	54
4.5	Desgaste de flanco	56
5	CONCLUSÕES	61

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Ferraresi (1977), o rendimento de todos os processos de usinagem está diretamente ligado aos parâmetros de corte e às propriedades das ferramentas empregadas no processo de fabricação. Conforme Klocke (2007), a definição do material a ser empregado na usinagem depende de parâmetros tais como carregamentos térmicos e mecânicos ou condições de contorno como custos de manufatura, usinabilidade, aceitação do público e reciclagem.

Em 2013, a indústria metalúrgica brasileira representou cerca de 2,2% do PIB, sendo o Brasil o 9º maior produtor mundial de aço bruto, e o 3º maior produtor mundial de minério de ferro, de acordo com o Sumário Mineral 2014 do Departamento Nacional de Produção Mineral. Porém, de acordo com o índice de preço de metais do Banco Mundial, houve excesso de oferta de metais, que ocasionou diminuição na demanda chinesa principalmente para minério de ferro, zinco, alumínio e cobre, além da conservação dos altos estoques mundiais de metais em decorrência da desaceleração da economia mundial, num âmbito geral.

Em virtude disso, a opção por materiais mais baratos ou a busca por materiais alternativos tem se tornado constante, onde os ferros fundidos têm aumentado seu espaço dentre os materiais usados na indústria metalomecânica por possuir ponto de fusão inferior ao dos aços.

Na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais está relacionado com o custo e a eficiência, medida pela relação “resistência/peso”. No esforço de alcançar estas exigências e devido ao surgimento de novas ferramentas, houve a necessidade de se empregar novos materiais na fabricação de peças, que apresentassem resistência similar aos materiais que já estavam sendo utilizados no mercado, mas com baixa densidade. Essa combinação de propriedades geralmente é obtida através da adição de elementos de liga ou por tratamento térmico, onde aumenta-se a resistência de materiais tradicionais (ROSA e DINIZ, 1999). Nesta relação de materiais melhorados através de tratamento térmico e adição de elementos de liga englobam-se os ferros fundidos que quase sempre oferecem boa usinabilidade e baixo custo de produção, mesmo em seu estado bruto.

A história do ferro fundido dúctil, também conhecido como nodular, tem sido influenciada por aprimoramentos contínuos que têm possibilitado inúmeras novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição. Os ferros fundidos

nodulares apresentam boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e ótimas propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada. Os ferros fundidos nodulares também possuem menor densidade que os aços forjados, chegando a uma redução de peso próxima a 8%. Devido a estas vantagens, esse material tem sido crescentemente utilizado em muitas aplicações estruturais, principalmente na indústria automotiva. Virabrequins, cames, válvulas, carcaças de bombas e articulações de direção são exemplos da utilização de ferro dúctil em veículos (TOKTAS et al, 2006).

O ferro fundido nodular austemperado (ADI), é um ferro fundido nodular tratado termicamente pelo processo de austêmpera, que surgiu recentemente como um importante material de engenharia, devido a uma excelente combinação de propriedades tais como tenacidade, boa ductilidade e alta resistência mecânica, resistência ao desgaste e a fadiga. Por estas propriedades únicas, encontradas somente em alguns tipos de aços, o ADI é agora usado em muitas aplicações estruturais na indústria automotiva, ferroviária, bélica, maquinários agrícolas, de mineração e construção civil, entre outras (TOKTAS et al, 2006).

Comparado com o ferro fundido nodular o ADI apresenta uma maior dificuldade de usinagem por se tratar de um material endurecido, e este grau de dureza é influenciado pela temperatura e tempo de austêmpera em que o material é submetido. Outro fator que reduz a usinabilidade do ADI é atribuído a austenita retida que pode se transformar em martensita durante a usinagem (SEAH e SHARMA, 1994).

Mediante esse quadro, o objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de desgaste de ferramentas de corte com coberturas diferentes (TiAlN e TiN) no torneamento de ferro fundido nodular austemperado. Avaliou-se a rugosidade superficial, para comparação de desempenhos. Durante os ensaios monitorou-se o desgaste das ferramentas, a potência de corte e a rugosidade da peça. Todas as operações foram realizadas seguindo os parâmetros recomendados pelo fabricante das ferramentas, sendo observado nos resultados que a melhor capacidade produtiva foi obtida.

1.1 Delimitação do tema

Análise da qualidade superficial na usinagem torneamento do ADI.

1.2 Justificativa

A principal limitação no processo de usinagem do ferro fundido nodular austemperado é o fato da usinabilidade do material ser relativamente baixa no estado austemperado. Esse problema se deve ao endurecimento por deformação que ocorre pela transformação da austenita, característica da microestrutura do ferro fundido nodular austemperado. A microestrutura afeta as etapas do processo de produção do material, sendo comum realizar o desbaste da peça antes do tratamento térmico e a usinagem de acabamento. Dessa forma, procura-se identificar padrões na usinagem desse material para parâmetros pré-estabelecidos, determinando assim as condições ideais para atingir as características dimensionais e superficiais desejadas.

1.3 Abordagem geral do problema

Como tornear ferro fundido nodular austemperado, dentro de parâmetros específicos, de modo que se obtenha a máxima eficiência ferramental com a melhor qualidade superficial possível.

1.4 Objetivo geral

Analisar o comportamento de desgaste das ferramentas de corte no torneamento de ferro fundido nodular austemperado.

1.4.1 Objetivos específicos

- a) Estudar o comportamento de usinagem do ferro fundido nodular austemperado;
- b) Usinar os corpos de provas utilizando dois parâmetros de corte e dois revestimentos de ferramentas;
- c) Analisar o desgaste das ferramentas;
- d) Analisar a qualidade superficial dos corpos de provas;
- e) Descrever e justificar as análises propostas neste estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Ferro fundido nodular austemperado

O ferro fundido nodular austemperado, também conhecido como ADI (Austempered Ductile Iron), teve seus primeiros experimentos publicados nos anos 60 pela International Harvester (produtores de máquinas agrícolas e veículos) e após extensa pesquisa, em 1972 entrou em serviço a primeira peça produzida em ferro fundido nodular austemperado. Fundições norte-americanas, finlandesas e chinesas iniciaram produções em série de peças manufaturadas em ferro fundido nodular austemperado, em especial engrenagens anteriormente fabricadas em ferros fundidos temperados e revenidos (KEIGHLEY LABORATORIES LTD, 2009).

Entre em 1984 e 1986, houve significativo aumento na produção mundial do ferro fundido nodular austemperado (CARMO, 2001). As indústrias de fundição viram no ADI uma oportunidade de expandir o seu mercado e competir com o aço forjado e fundido, iniciando uma onda de pesquisas e desenvolvimento em escala mundial (CAKIR et. al., 2008).

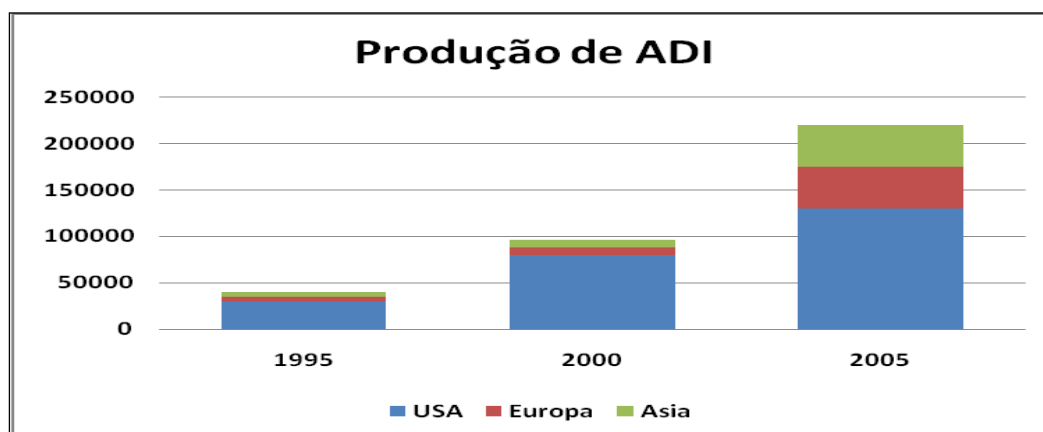
Todavia, ainda no início dos anos 90, o Brasil permanecia alheio às potencialidades desse material. Hoje o sucesso esperado ainda não se concretizou na indústria brasileira. Isto pode ser explicado por diferentes razões (MORRISON, 2000):

- a) Os custos do tratamento térmico são altos na maioria das vezes, de modo que em muitos casos a vantagem econômica é muito pequena quando comparada com a quantidade de peças forjadas produzidas.
- b) A maioria das fundições não possuem equipamentos apropriados para realizar o tratamento térmico de austempera para o ferro fundido nodular;
- c) Para a produção do ADI se faz necessário um controle rigoroso na composição química e conseqüentemente a estrutura bruta de fundição antes do tratamento térmico, a fim de auxiliar na garantia das propriedades mecânicas exigidas;
- d) Alguns projetistas têm certo receio em trocar o ADI por aço forjado, apesar do ADI ser um material que já está consolidado há vários anos nos USA;

Dias (2006) apresenta dados de produção de ferro fundido nodular austemperado colocando a projeção de 300 mil toneladas produzidas em nível mundial em 2010 e 500 mil toneladas em 2020. No ano 2005 a produção mundial já

ultrapassava de 220.000 ton/anual, conforme demonstra a figura 1. Já Lahres (2008) diz que nos últimos anos, a produção do ADI obteve mais sucesso nos Estados Unidos do que na Europa, onde a produção mundial deste material é de aproximadamente 280.000 toneladas por ano.

Figura 1 – Produção de ADI, de acordo com dados da DAIMLERCHRYSLER.



Fonte: LAHRES, et. al. 2008

2.1.1 Características

O ferro fundido nodular austemperado é um ferro fundido (nodular) que é submetido ao tratamento de austêmpera. O ADI possui elevada tenacidade associada à resistência, à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia competitivo, pois apresenta associação de propriedades antes encontradas somente nos aços. Se comparado com ferro fundido nodular bruto de fusão, o material tratado é duas vezes mais resistente à tração. Já comparado a alguns aços, possui resistência à fadiga igual ou superior, maior capacidade de amortecimento de vibrações, maior resistência ao alongamento, é mais fácil de usar do que os aços com durezas equivalentes, sendo a grafita a responsável pelas propriedades físicas do material. Também são 100% recicláveis (SORELMETAL, 2002).

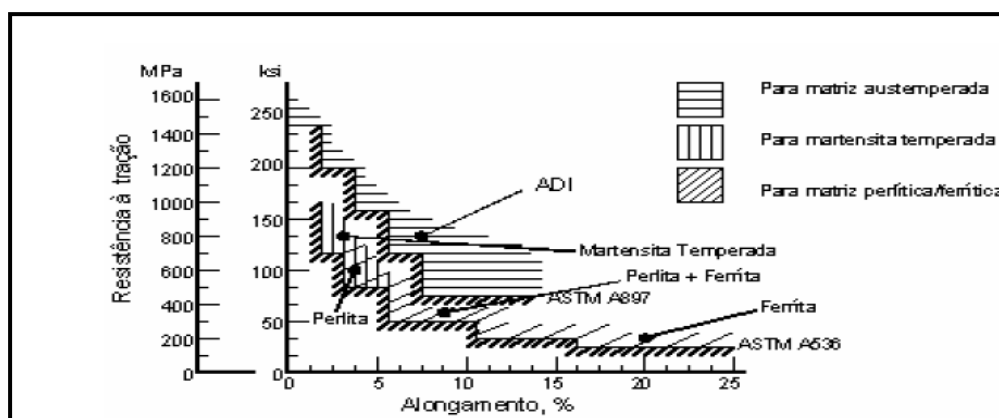
Sua estrutura é composta pela grafita na forma esferoidal dispersa na matriz de ferrita acicular e austenita estável. Com essa microestrutura, esse ferro fundido apresenta elevados valores de resistência mecânica, resistência ao impacto e ao desgaste, ductilidade, proporcionando grande flexibilidade à concepção e fabricação de peças. Por estas propriedades únicas, o ADI é usado extensivamente em muitas

aplicações estruturais na indústria automotiva, bélica e maquinários agrícolas entre outras. (LUSSOLI, 2003; CARMO e DIAS 2001; DIAS, 2006).

A composição química e a produção de um ferro fundido nodular austemperado são similares às de um ferro fundido nodular convencional, diferindo basicamente pelo tratamento térmico ao qual o primeiro é submetido após o acabamento. Em alguns casos, como de peças de grande espessura, se adicionam ao nodular austemperado elementos de liga como o Cobre, Níquel e Molibdênio, com o objetivo de dificultar a formação da perlita e auxiliar a formação da estrutura de ferrita mais austenita obtida no tratamento térmico de austêmpera. Dessa forma se melhora a austemperabilidade do ferro fundido (CARMO e DIAS, 2001).

O tratamento térmico realizado para a obtenção do ferro fundido nodular austemperado consta de aquecimento do material a uma temperatura entre 825 a 950°C permanecendo nessa temperatura entre 1 a 3 horas, onde a estrutura do material se torna austenítica. Em seguida, o material é resfriado rapidamente até a temperatura de austêmpera desejada (entre 230 a 400°C), ou seja, que permita a obtenção de ferrita acicular, e aí permanece por um período de 0,5 a 4 horas. A peça é, então, resfriada até a temperatura ambiente, tendo-se o cuidado de não iniciar a transformação bainítica, pois a estrutura a ser obtida é ferrita acicular e austenita estabilizada (ausferrita) (METALS HANDBOOK, 1988). Para isso, o tempo de retirada da peça do banho de sal até seu resfriamento em água deve ser o mínimo, respeitando-se a curva de transformação do material. (CUEVA-GALÁRRAGA, 2000). A Figura 2 mostra a resistência a tração X alongamento que são atribuídos ao material de acordo com as microestruturas formadas durante o tratamento.

Figura 2 - Resistência mecânica à tração versus alongamento em função da matriz do ADI



Fonte: Soremetal (2002)

O ADI oferece, portanto, uma combinação de resistência à tração e alongamento superior ao ferro fundido nodular comum. É importante destacar ainda que o ferro fundido nodular é 10% menos denso que o aço. Pode superar também os aços forjados em muitas aplicações. No entanto, as propriedades do ADI não superam os aços de alta resistência. De acordo com Klocke et al (2007) uma propriedade excepcional do ferro fundido nodular austemperado é a sua resistência ao desgaste, onde os valores apresentados são superiores aos do aço forjado para qualquer valor de dureza.

2.1.2 Aplicações

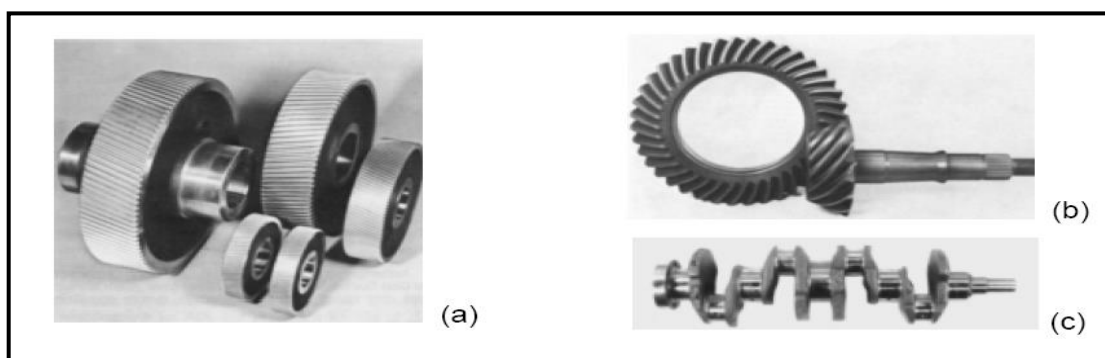
Nos últimos trinta anos, especialistas em tratamento térmico e engenheiros de equipamentos refinaram o processo de austêmpera para permitir a produção confiável de materiais austemperados de alta qualidade e confiabilidade. Isso permitiu um aumento na demanda deste material, ao mesmo tempo em que designers e engenheiros buscavam maior desempenho e economia de seus componentes e sistemas. Os fabricantes envolvidos em peças móveis e itens críticos de segurança iniciaram a utilização deste material, se beneficiando de maior resistência, maior resistência ao desgaste, redução de ruído e economia de peso.

A produção deste material normalmente destina-se a peças utilizadas na construção de máquinas em geral: na indústria ferroviária como rodas para locomotivas e vagões e acoplamentos de sapatas de freio; peças de desgaste para máquinas de mineração e equipamentos petrolíferos; na agricultura, em equipamentos de terraplenagem e ferramentas para movimentação de terra como pontas de escavadeira, cilindros, correntes transportadoras, rodas dentadas, eixos de transmissão; na indústria automotiva, alto emprego na fabricação de peças como: suspensão, girabrequins, diferenciais, eixo-comando de válvulas, bielas, engrenagens, componentes do sistema de suspensão e suportes de molas de caminhões, conforme exemplo da Figura 3, entre outras (SOREMETAL, 2002). Na indústria bélica é utilizado na fabricação de componentes de armas e também em lâminas de espadas.

Muitas das aplicações até o momento foram nas indústrias automotiva, terrestre e de máquinas. Porém, há fortes investimentos em sistemas para tratamento de peças de aplicação em geradores de energia renovável. Usado em lugar de aço e alumínio,

o ADI pode trazer economias significativas de peso e custo. Magalhães (2002) comenta que o ADI possui uma grande capacidade de amortecimento e tem menor peso específico que o aço, sendo 10% menos denso. Estas duas propriedades são de grande importância para a maioria das aplicações. Engrenagens fabricadas neste material, por exemplo, são mais leves e mais silenciosas que engrenagens de aço

Figura 3 - Exemplos de peças: (a) engrenagem em ADI, (b) coroa e pinhão e (c) virabrequim de motor turbo



Fonte: SORELMETAL , 2002

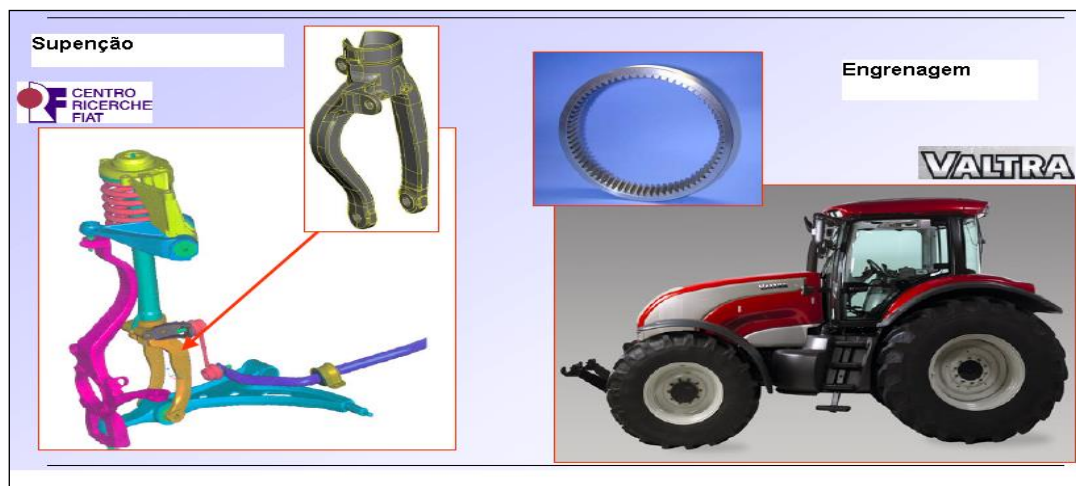
2.2 Usinagem do ferro fundido nodular austemperado

Na indústria de manufatura pode-se estimar 25% do tempo de produção é despendido no processo de usinagem (SANTOS, 2004). Sabendo-se que uma das aplicações dos ferros fundidos nodulares austemperados está voltada para a indústria automobilística (TOKTAS et al, 2006), e estudos desenvolvidos por Neri e Carreño (2003) mostraram que a elevada microdureza e regiões de concentração de perlitas finas nas peças automotivas dificultavam a usinagem das mesmas. Deste modo, pesquisas sobre a usinabilidade destes materiais e principalmente dos ferros fundidos austemperados, os quais vêm em substituição aos nodulares são de fundamental importância para o setor automobilístico e em contribuição com o ramo de metalurgia.

O ADI nos anos 70 ganhou grande espaço na produção de autopeças na General Motors (USA) e na Johansson (Finlândia), inicialmente sendo utilizado na produção de engrenagens, e após intensas pesquisas seu uso como material de engenharia ganhou espaço devido a suas propriedades mecânicas, como resistência, ductibilidade, resistência ao impacto e ao desgaste. Todavia, dependendo das condições de fabricação e tratamento térmico, o ADI apresenta diferentes configurações de propriedades mecânicas e físicas (SILVA, 2006).

De acordo com o centro de desenvolvimentos de novos produtos da FIAT (NICOL, 2008) a utilização do ADI na produção de autopeças e equipamentos agrícolas trazem muitas vantagens ao processo produtivo: a diminuição de custos, aumento da resistência e facilidade de usinagem. A figura 4 demonstra algumas das peças fabricadas a partir do ADI.

Figura 4 - Peças de máquinas agrícolas, suspensão de trator



Fonte: NICOL, 2008

Lahres, et al (2008) comenta das vantagens na substituição de aço forjado por ADI pela redução de custo, propriedades mecânica e apelo ecológico, também comenta que a empresa está substituindo grande parte das peças utilizadas na DAIMLERCHRYSLER.

Segundo Harding (1986), outra vantagem significativa do uso deste material é o custo do seu tratamento térmico, que é muito inferior ao custo dos tratamentos que são realizados nos aços, podendo chegar a uma redução de 60% associada ao tratamento. Normalmente são utilizados equipamentos mais simples e as temperaturas utilizadas são mais baixas que as temperaturas para endurecimento de aços.

2.2.1 Usinabilidade do ferro fundido nodular austemperado

Conforme Klocke e Klöpffer (2006), comparado com o ferro fundido nodular e com aços de resistência similar, o ADI apresenta maior dificuldade de usinagem, ocasionada também pela dureza da ausferrita, e esta dureza é influenciada pela temperatura de austêmpera em que o material é submetido, conforme relatam estudos

desenvolvidos por Erdogan et al. (2006) e Da Silva et al. (2007). Outro fator que reduz a usinabilidade desse material é atribuído à austenita retida que pode se transformar em martensita durante o processo (SEAH e SHARMA, 1994).

Estudos demonstram que a vida da ferramenta diminui com o aumento da dureza do ADI. Como regra geral, na usinagem deste tipo de material aconselha-se seguir as especificações técnicas recomendadas para ferros fundidos nodulares de alta resistência (KENNAMETAL, 2009).

Alguns dos fatores que influenciam na usinabilidade deste tipo de ferro fundido incluem microcarbonetos, macro-inclusões, resistência, distribuição da grafita, carbonetos e carbonitretos, e em forma menos decisiva, as condições de limpeza do processo de fundição. Carbonetos, óxidos, nitretos, areia e outras fases que podem estar presentes no ferro são muito abrasivas e podem acelerar o desgaste da ferramenta.

Dependendo das condições do tratamento térmico empregado, os componentes do ADI poderão ter uma elevada dureza. Embora certos graus sejam mais facilmente usináveis que outros, é recomendado que a maior parte da usinagem seja feita antes do tratamento térmico, quando o material está em sua condição de menor dureza.

Austempered (2009) cita que em condições ideais, toda a usinagem deveria ser realizada antes da austêmpera, pelas mudanças que acontecem durante o tratamento térmico. Nos casos em que é necessário realizar o acabamento depois da austêmpera (como é o caso de mudanças dimensionais depois do tratamento térmico), o uso de ferramentas de metal duro revestidas permite a usinagem de torneamento.

Segundo Cakir (2007), na usinagem do ADI deve ser seguida uma das três estratégias seguintes:

- a) Usinagem completa antes do tratamento térmico;
- b) Operações de desbaste antes e acabamento depois do tratamento térmico;
- c) Usinagem completa depois do tratamento térmico.

A usinagem completa antes do tratamento térmico permite realizar todas as operações de corte na condição ferrítica ou ferrítica-perlítica, utilizando elevadas velocidades de corte e avanço. Porém, mudanças dimensionais depois do tratamento

térmico, ou diminuição das propriedades de superfície pela perda de carbonetos das camadas superficiais, exigirão operações suplementares de acabamento.

A alternativa de desbaste antes e acabamento depois do tratamento térmico envolve complicações logísticas uma vez que as instalações de tratamento térmico nem sempre se encontram dentro do chão de fábrica. Finalmente, a usinagem completa depois do tratamento térmico é viável hoje em dia porque a tecnologia das ferramentas de corte e os processos de usinagem permitem a usinagem de novos materiais com elevada resistência.

2.2.2 Efeito da microestrutura sobre a usinabilidade

A usinabilidade do ferro fundido depende fortemente de sua microestrutura. A microestrutura resultante do tratamento é que será responsável pelas características adquiridas de combinação de resistência mecânica, resistência ao desgaste e à fadiga, tenacidade, tornando o material interessante para um grande número de aplicações na engenharia. A forma da grafita no ferro fundido determina o seu tipo. A presença de grafita proporciona características de fácil usinagem, enquanto sua forma e quantidade estabelecem a força de corte necessária e o possível acabamento da superfície a ser obtido com um processo de corte. A microestrutura da matriz da grafita determina a vida da ferramenta e estabelece os níveis de avanço e velocidades de corte a serem utilizados. A matriz ausferrítica tem a resistência à fadiga mais elevada entre os ferros fundidos com diferentes estruturas de matriz devido à austenita não transformada na microestrutura. Além disso, esta estrutura tem a melhor combinação de propriedades de dureza e resistência à tração (SORELMETAL, 2002).

O fator abrasivo é devido às inclusões de areia e carbonetos livres, que é muito negativa para efeitos de usinabilidade (KLOCKE, 2007).

Na usinagem dos ferros fundidos nodulares austemperados, a vida da ferramenta e as velocidades de corte são diretamente influenciadas pela microestrutura. Grafita no ferro fundido é importante para suas características de fácil usinagem, mas a vida da ferramenta depende da microestrutura da matriz ao redor da grafita (CAKIR et. al, 2008). Os ferros fundidos nodulares austemperados têm elevada tensão de resistência, equivalente aos aços temperados, contudo para operações de torneamento e furação com metal duro revestidos têm mostrado que levam a menores taxas de desgaste (KLOCKE, 2007).

2.2.3 Efeitos dos elementos de liga sobre a usinabilidade

Quando se deseja melhorar as propriedades do ferro fundido nodular austemperado, há uma alternativa de austenitização dentro da zona crítica seguido da austêmpera, onde se obtém uma mistura de ferrita, ferrita bainítica e austenita estabilizada, melhorando, dessa forma, a tenacidade (GUESSER, 2009).

Com a inclusão de elementos de liga (Cu, Ni e Mo) que se obtém maior temperabilidade e dessa forma, consegue-se evitar a formação de perlita durante o resfriamento entre a austenitização e a austêmpera, entretanto faz-se necessário considerar os efeitos da segregação dos elementos de liga na solidificação, pois estes, prejudicam as propriedades dos materiais, principalmente a usinabilidade e o alongamento. Portanto faz-se necessário limitar-se estes elementos de liga onde o manganês não deve ultrapassar os 0,3%, o de molibdênio em 0,2%, o de níquel em 2,0%, e o de cobre em 1%. A inoculação também minimiza os problemas de segregação, pois a mesma tem a capacidade de distribuir a segregação através do aumento do número de células eutéticas (GUESSER, 2009; CHIAVERINI, 1996).

O elevado teor de carbono das ligas de ferro fundido e a presença sempre obrigatória do elemento silício tornam necessários considerá-los como ligas ternárias Fe-C-Si, de modo que os fenômenos de transformação da austenita, no resfriamento lento, são mais complexos, originando estruturas em que um novo constituinte se apresenta o carbono livre ou grafita cuja forma, disposição e quantidade alteram profundamente as propriedades desses materiais (CHIAVERINI, 1996) e, por conseguinte, influenciam significativamente a usinabilidade dos ferros fundidos.

Além da influência do silício na usinabilidade via transformação do carbono em grafita para a formação de ferro fundido cinzento, (que tem boa usinabilidade), o comportamento da usinagem dos ferros fundidos é fortemente influenciado pela composição através dos efeitos de elementos de liga sobre a formação de carboneto ou de grafita (DINIZ, et. al, 2006).

Os aditivos no ferro fundido influenciam na usinabilidade porque formam ou impedem a formação de carbonetos, influenciando na resistência e/ou dureza. A estrutura interna do ferro fundido é afetada pelo material de liga, os quais, dependendo das suas características individuais, podem ser divididos em dois grupos (SEKER et. al, 2006):

- a) Formadores de Carbonetos: Cr, Co, Mn, Mo e V;
- b) Elementos grafitizantes: Si, Ni, Al, Cu e Ti.

Em ensaios de usinabilidade com investigação voltada para a rugosidade e forças de corte nos ferros fundidos nodulares, os ligados ao níquel (0,7%) e cobre (0,7%) apresentaram os melhores resultados em termos de rugosidade e maiores forças de corte quando comparados com as amostras de ferros fundidos nodulares não ligados, comprovando a eficácia dos elementos de liga na microestrutura do material (SEKER et al, 2003).

2.3 Usinagem em torno

Conforme Ferraresi (1977), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. É o método de corte de metal onde a ferramenta faz um avanço linear, gerando peças simples e até peças complexas, sendo as mesmas usinadas até certa dimensão especificada e suave acabamento. É um processo muito utilizado apesar das novas tecnologias encontradas atualmente.

A operação de torneamento varia em função do material a ser utilizado, formato, da complexidade da peça, das condições e do custo envolvido na peça a ser produzida. Esses fatores influenciam diretamente no ferramental que deverá ser utilizada para a produção: o porta-ferramenta, material do inserto, formato, tamanho, revestimento e fixação do mesmo. Algumas operações podem até exigir ferramentas especiais. Atualmente a produção de ferramentas é muito automatizada, onde as mesmas são cuidadosamente projetadas com base em décadas de experiência, pesquisa e desenvolvimento.

Outros fatores que influenciam diretamente a usinagem são os parâmetros de corte utilizados, de modo que os princípios usados nas máquinas e ferramentas permitem obter as superfícies desejadas. Segundo Ferraresi (1977), o processo de torneamento tem dois fatores que influenciam diretamente na qualidade do processo

e na qualidade dimensional da peça: geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte utilizados no processo:

Velocidade de corte (V_c): De acordo com Stemmer (2005), é a velocidade instantânea do movimento principal, do ponto selecionado da aresta de corte em relação a peça;

Movimento de avanço (f): é o movimento da ferramenta gerado manualmente ou pela máquina que tem como objetivo provocar deslocamento entre a peça e a ferramenta. Quando somado ao movimento de rotação da peça leva a remoção do material e conseqüente geração contínua ou interrompida de cavacos, além de gerar uma superfície usinada de acordo com o desejado;

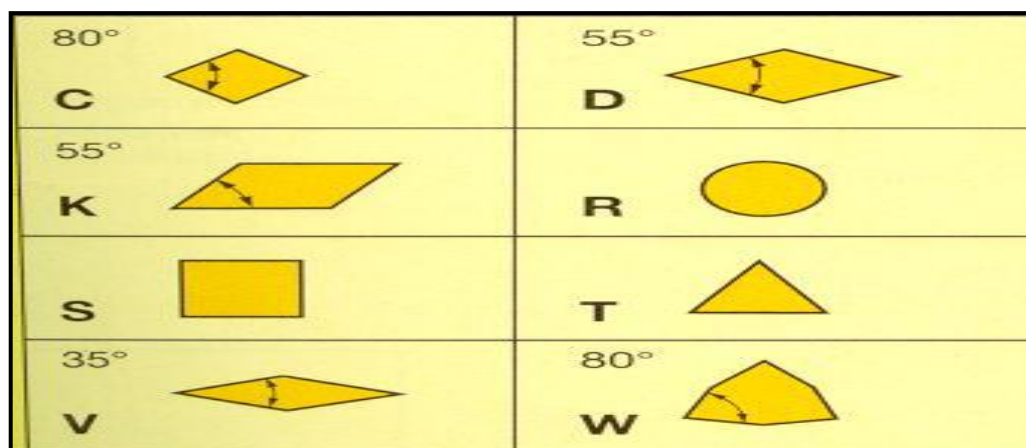
Profundidade de corte (a_p): é a espessura ou profundidade de penetração medida perpendicularmente ao plano de trabalho da peça.

Conforme Diniz (2000), sabe-se que operações de desbaste se utilizam de velocidades de corte baixas, grande profundidade de corte e alta taxa de avanço. Já para operações de acabamento, o contrário é verdadeiro.

2.4 Ferramentas usadas para torneamento de ADI

Para a produção dos corpos de provas empregam-se ferramentas de corte denominadas de porta-ferramenta e insertos que podem ser de diversos tipos, formatos e tamanhos, tais como mostra na Figura 5. Esses insertos possuem revestimentos diferentes para cada aplicação podendo até mesmo ter mais que um revestimento num único inserto.

Figura 5 - Principais formatos dos insertos



Conforme Stemmer (2005), uma das etapas mais importantes no processo de usinagem é a escolha do material da ferramenta. Para ser utilizado como ferramenta de corte na usinagem, os materiais precisam atender algumas exigências básicas: elevada dureza a frio (muito superior à dureza da peça a ser usinada); elevada dureza a quente; tenacidade para resistir a esforços de corte e impactos; resistência à abrasão; estabilidade química e facilidade de obtenção a preços econômicos.

Os materiais utilizados na produção de ferramentas atualmente são os aços-ferramentas, aços rápidos comuns, aços rápidos com cobalto, ligas fundidas, carbonetos sintetizados (metal duro), cerâmica, Nitreto Cúbico de Boro, Diamante.

2.4.1 Carbonetos sintetizados

De acordo com Souza (2004), as ferramentas de carboneto sintetizado (metal duro – MD) detêm em torno de 50% do mercado de ferramentas de usinagem.

A base das ferramentas de MD é o Carboneto de Tungstênio, apesar de normalmente estar ligado a outros elementos na busca de otimização das propriedades da ferramenta: suportar elevadas temperaturas na região de geração do cavaco, aliar dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste e tenacidade.

2.5 Revestimento

O maior objetivo ao se revestir uma ferramenta é aliar características múltiplas às ferramentas de corte dando uma performance bem superior à uma ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos. A grande influência deste revestimento se dá em razão da grande proteção contra os desgastes, redução do atrito no corte, fazer cortes a seco e aumentar sua vida útil. Os revestimentos são adicionados tendo como base da ferramenta o metal duro.

A resultante de se revestir uma ferramenta de corte é obter propriedades mecânicas como resistência ao desgaste, dureza a quente e tensões compressivas. Como propriedades físicas, tem-se a estabilidade química, boa adesão e resistência à corrosão, tanto a temperatura ambiente quanto a temperaturas elevadas (BOUZAKIS, 1999).

A utilização do revestimento Nitreto de titânio alumínio (TiAlN) é uma alternativa na redução da utilização de fluídos de corte na usinagem. O bom desempenho da

usinagem a seco com ferramentas de corte revestidas com TiAlN é devido ao fato que esse revestimento mantém as propriedades de alta dureza, resistência à oxidação e boa resistência operando a altas temperaturas. Sua excepcional resistência química e térmica melhora o desempenho de componentes altamente sobrecarregados. A alta resistência deste revestimento de camada única dá proteção extraordinária contra a erosão e o desgaste abrasivo. A relação otimizada da resistência e da fadiga residual da compressão do revestimento de TiAlN aumenta a estabilidade da aresta de corte das ferramentas de usinagem (SANTOS, 2004).

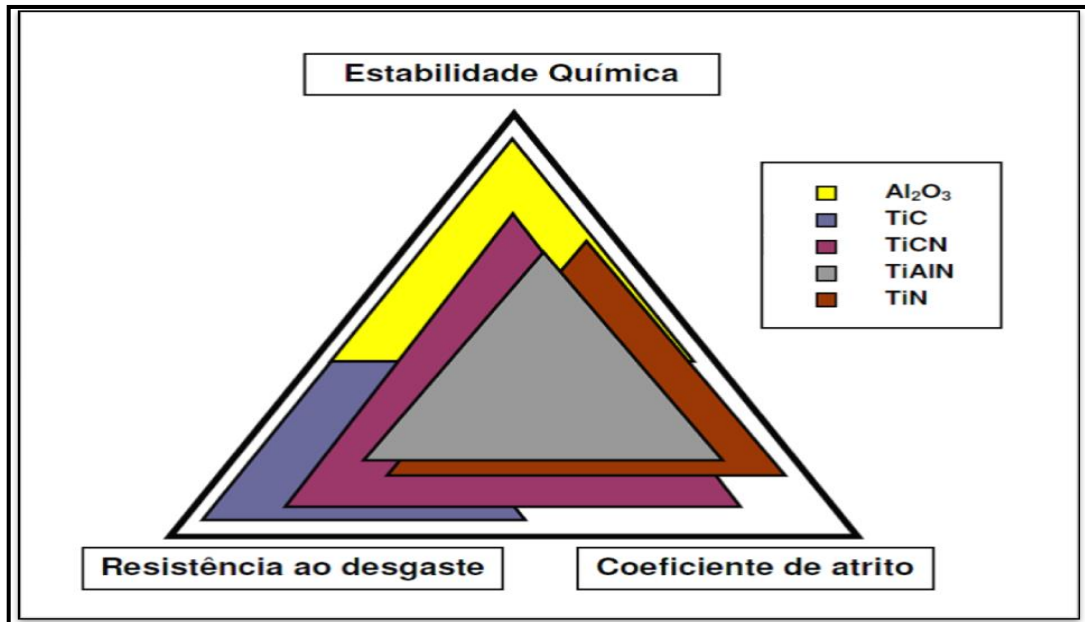
Na busca por melhoria nas ferramentas e o total domínio das coberturas TiAlN onde melhorias só acontecem pontualmente levou ao desenvolvimento de novas gerações de revestimentos baseados nos elementos Al-Cr-N. A grande vantagem desses sistemas é a otimização da resistência ao desgaste abrasivo, da dureza a altas temperaturas e da resistência a oxidação, em comparação com os revestimentos tradicionais de TiAlN. A realização de testes abrangentes demonstra que, tanto a altas velocidades de corte quanto em condições convencionais, há uma melhoria efetiva da eficiência.

Para que um revestimento realmente seja eficaz, é necessário a escolha certa do substrato para uma determinada aplicação. Materiais cerâmicos como carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al₂O₃) e Nitreto de Titânio (TiN), proporcionam uma barreira ao desgaste e aos danos por transferência térmica. Cada um deles tem um desempenho melhor em uma função específica. O TiN é um revestimento cerâmico de elevada dureza combinada com propriedades de baixo atrito e proporciona à ferramenta uma vida consideravelmente mais longa, ou melhor desempenho de corte em comparação às ferramentas que não tenham sido revestidas. Comparada ao TiC, o TiN leva vantagem por gerar menor difusão dos materiais ferramenta-peça. Dessa forma há menos geração de cratera na superfície de saída de cavaco.

A Figura 6 mostra as propriedades e as características das principais coberturas utilizadas atualmente. Conforme Mason (2003), quanto mais espessas forem as coberturas, mais eficaz será a barreira ao desgaste. Contudo, essas coberturas têm um limite de espessura, devido a tensão, faz com que elas percam aderência e descasquem de cima do inserto. As espessuras ideais são de cerca de 20 µm para cobertura CVD e 6 µm para cobertura PVD. Espessuras superiores a essas, produzem um efeito negativo no inserto. Já camadas muito finas, apesar do

substantial aumento da dureza e tenacidade, favorecem a fragilidade e o lascamento. Deve-se, portanto, executar o revestimento para que se obtenham um balanço adequado entre dureza e tenacidade nas propriedades da ferramenta de corte.

Figura 6 - Principais propriedades das coberturas



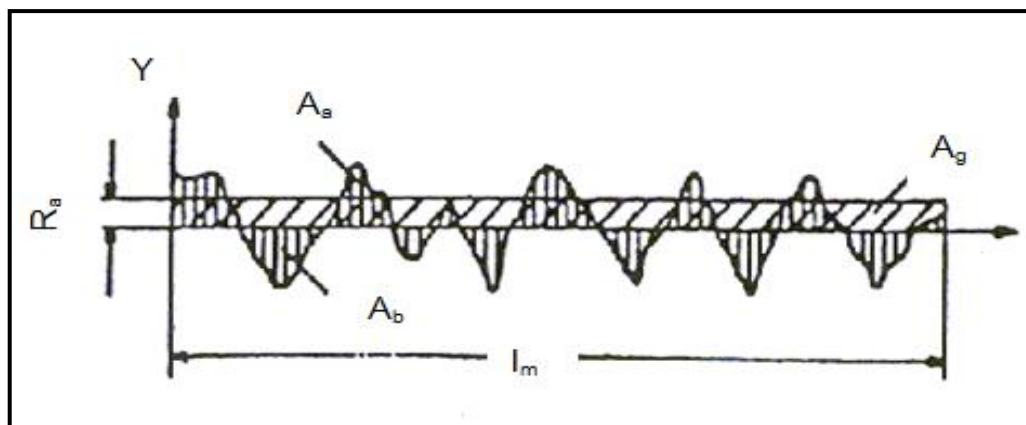
Fonte: Iscar Ltd., 2001

2.6 Qualidade superficial e dimensional

As superfícies dos componentes mecânicos devem atender ao tipo de utilização dos mesmos. Quanto maior for a exigência de projeto, mais intenso deve ser o estudo da qualidade de superfície. São os processos de fabricação dos componentes que determinam os diversos acabamentos nas superfícies. Em geral, a produção de superfícies menos rugosas possui custo de fabricação mais elevados.

Micheletti (2001) define a rugosidade como sendo o conjunto de irregularidades da superfície real em relação à superfície técnica ou de referência, (Figura 7). Existem dezenas de parâmetros utilizados na avaliação de superfícies em diversas aplicações. A qualidade da superfície das peças normalmente são consequência dos parâmetros de entrada. A rugosidade no torneamento é decorrente principalmente do raio de ponta da ferramenta de corte e do avanço (JESUS FILHO, 2006).

Figura 7 - Conceitos básicos na avaliação de superfícies



Fonte: KÖNIG e KLOCKE, 1997

Dentre os métodos de medição de rugosidade temos R_a , R_y , R_z e R_{3z} . Diniz (2000) afirma que o parâmetro mais utilizado para controle de rugosidade é o R_a . Este é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples, (FACCIO, 2002). Define-se como a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real em relação à linha média, Equação 1.0 (FACCIO, 2002).

Este parâmetro tem a desvantagem de não esclarecer a ordem de grandezas dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

$$R_{a=\frac{1}{l}} \int_{x=0}^{x=1} |h_1| \cdot dx \quad (1.0)$$

2.7 Ensaios de tração

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova, geralmente padronizado, onde se pode afirmar que as deformações são uniformemente distribuídas ao longo de todo um corpo de prova específico até a ruptura. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da força aplicada. Essa variação é de extrema importância para o Engenheiro, que por meio de pontos ou de uma reta dada pela máquina determina a curva tensão-deformação do material. Porém ao se alcançar o ponto de tensão máxima suportada pelo material, a uniformidade na deformação

termina devido ao aparecimento do fenômeno de estricção, ou diminuição da seção do corpo de prova, para metais com certa ductilidade. A ruptura se dá na faixa estrita do material, a menos que defeitos internos promovam a ruptura em algum ponto fora dessa região, o que é de rara ocorrência (SOUZA,1982).

Em engenharia o ensaio de tração é amplamente utilizado na determinação de dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, como por exemplo: limite de resistência a tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_p), módulo de tenacidade (U_t), ductilidade, coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (K), o modo de obtenção dessas propriedades é analisado nos parágrafos abaixo e também ao longo desta revisão teórica (GARCIA,2000).

Na maioria dos metais existe uma transição gradual do comportamento elástico para o plástico, e o ponto no qual a deformação plástica tem início é difícil de ser definido com precisão. Vários critérios para determinar o início do escoamento são usados, dependendo da sensibilidade das medidas de deformação e da finalidade de utilização dos dados.

A inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é uma medida de rigidez do material. Quanto maior é o módulo de elasticidade, menor é a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada carga. Uma vez que o módulo de elasticidade é necessário para o cálculo da deflexão de vigas e outros componentes, ele se torna um valor importante para projetos (MEYER, M.A, CHAWLA, K.K,1982).

Em geral, as medidas de ductilidade podem interessar de três maneiras:

- a) Para indicar a extensão na qual um metal pode ser deformado sem fraturar em operações de transformação mecânica como a laminação e a extrusão.
- b) Para indicar ao projetista, de uma maneira geral, a capacidade do metal escoar plasticamente antes da fratura. Uma alta ductilidade indica que o material é fortemente propenso a se deformar de maneira localizada antes de se romper.
- c) Para servir como um indicador da mudança do nível de impurezas ou condições de processamento.

Medidas de ductilidade podem ser especificadas para avaliar a "qualidade" do material ainda que não exista uma relação direta entre as medidas de ductilidade e o

desempenho em serviço. As medidas convencionais de ductilidade que são obtidas do teste de tração são a deformação de engenharia na fratura (normalmente chamada de alongamento) e a redução de área na fratura ou estrição (MEYER, M.A, CHAWLA, K.K,1982).

A tenacidade de um material é a sua capacidade para absorver energia na região plástica. A capacidade de suportar tensões ocasionais acima da tensão de escoamento sem fraturar é particularmente desejável em peças como engate de vagões de carga, engrenagens, correntes e ganchos de guindastes.

A tenacidade é um conceito comumente usados que é difícil de ser definido, usualmente define-se tenacidade como a área total sob a curva tensão deformação. Essa área é uma indicação da quantidade de trabalho por unidade de volume que pode ser realizado no material sem causar a sua fratura (DIETER,1982).

Os dados obtidos por um ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão e porcentagem de impurezas presente no material (GARCIA, 2000).

Em regime plástico o material é submetido a tensões onde as deformações, e o movimento de discordâncias tornam-se permanentes. Materiais de naturezas distintas possuem comportamentos característicos durante o ensaio de tração. Porém o resultado do ensaio de tração é a curva tensão x deformação de engenharia (Figura 8), onde pode-se observar o comportamento de um material metálico, até a sua fratura (GODEFROID et al., 2010).

Figura 8 - Curva tensão - deformação de engenharia.



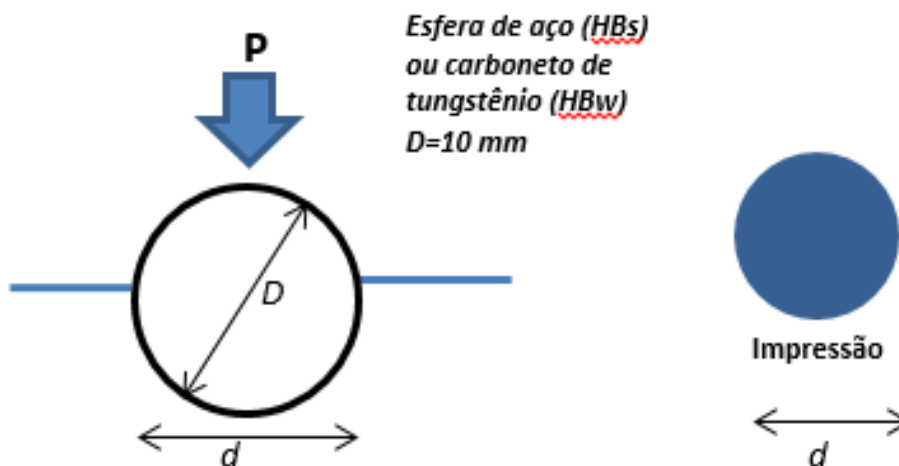
Fonte: (DIETER ,1982)

2.8 Ensaio de dureza Brinell

É um dos tipos de dureza mais utilizado na área de engenharia.

Consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço (geralmente temperado ou de carboneto de tungstênio) de diâmetro D sobre a superfície plana, polida e limpa de um metal através de uma carga P , durante um tempo t . Essa compressão provocará uma impressão permanente no metal com formato de uma calota esférica, tendo um diâmetro d . Portanto, quanto maior a dureza do material ensaiado, menor será o diâmetro da calota (SOUZA, 1982). A figura 9 demonstra o esquema de impressão de calota para dureza Brinell:

Figura 9 – Esquema de impressão de calota dureza Brinell



Fonte: (SOUZA, 1982)

A dureza Brinell é definida em N/mm^2 ou kgf/mm^2 , como o quociente entre a carga aplicada pela área de contato (área da calota). Entretanto, é prática usual a utilização apenas do número representativo da dureza, seguido do símbolo HB, pois o número Brinell não é um conceito físico satisfatório, uma vez que a equação da dureza não significa a pressão média sobre a superfície da impressão (SOUZA, 1982). Abaixo, a equação (2.0) para cálculo da dureza Brinell:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.0)$$

O tempo de aplicação da carga é da ordem de 10 a 15 segundos.

Tanto a carga quanto o diâmetro da esfera dependem do material, os quais devem ser adequados ao tamanho, à espessura e à estrutura interna do corpo de prova (GARCIA, 2000).

A tabela 1 mostra os principais fatores de carga utilizados e as respectivas faixas de dureza e indicações do material.

Tabela 1 – Fator N

$\frac{F}{D^2}$	DUREZA	MATERIAIS
30	90 a 415 HB	Aços e ferros fundidos
10	30 a 140 HB	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	15 a 70 HB	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	até 30 HB	Chumbo, estanho, antimônio e metais-patente

Fonte: ABNT NBR NM 187-1

O diâmetro da esfera é determinado em função da espessura do corpo de prova ensaiado. No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota. A tabela 2 mostra os diâmetros de esfera mais usados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

Tabela 2 – Diâmetros de esfera mais utilizados

DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	F (kgf) = 30 D ²	F (kgf) = 10 D ²	F (kgf) = 5 D ²	F (kgf) = 2,5 D ²
10	3.000	1.000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625

Fonte: ABNT NBR NM 187-1

O tamanho relativamente grande da impressão de Brinell pode ser uma vantagem para avaliação de dureza em materiais com estrutura interna não uniforme (ferros fundidos, por exemplo) ou com heterogeneidades localizadas; por outro lado, o grande tamanho da impressão pode impedir o uso desse teste em peças pequenas ou em partes criticamente tensionadas, onde a impressão pode ser um local preferencial para a falha mecânica da peça (GARCIA, 2000).

O ensaio de dureza Brinell não é adequado para caracterizar peças que tenham sofrido tratamentos superficiais (cementação, por exemplo), pois a penetração pode ultrapassar a camada tratada do material e gerar erros nos valores obtidos (BRANCO, 1985).

O ensaio Brinell é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas. É feito em equipamento de fácil operação. Por outro lado, o uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada. Usando-se esferas de aço temperado só é possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera.

2.9 Ensaio metalográfico

A observação metalográfica é um meio extremamente eficaz para prever ou explicar o comportamento e as propriedades de uma peça metálica, pois permite conhecer a estrutura do material, os seus constituintes micro estruturais (fases), bem como a morfologia e a distribuição destes (COUTINHO, 1980).

Um ensaio metalográfico é constituído de dois processos distintos, mas que se completam, sendo o primeiro a macrografia, que consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e, em geral, atacada por um reativo apropriado, sendo que a observação das amostras é feita a olho nu; e o segundo processo é a micrografia, caracterizada pelo auxílio do microscópio para visualização de microestrutura (BAPTISTA, 1998).

Pela macrografia obtêm-se informações de caráter geral, processo de fabricação e homogeneidade do material da peça, presença, quantidade e distribuição de impurezas, etc.

A análise de amostras metálicas através da micrografia visa a determinação de seus constituintes e de sua textura. A análise também é feita em superfícies polidas e, em geral, atacadas por um reativo adequado. Com o auxílio da técnica apropriada, consegue-se tornar visível a textura microscópica do material, pondo assim em evidência os diversos grãos de que é formado (GARCIA, 2000). A importância deste exame decorre do fato de as propriedades mecânicas de um metal dependerem não só de sua composição química como também de sua textura. Com efeito, um mesmo material pode tornar-se mole, duro, duríssimo, quebradiço, elástico, tenaz, etc.,

conforme a textura que apresentar e que lhe pode ser dada por meio de trabalhos mecânicos ou tratamentos térmicos adequados (BAPTISTA, 1998).

2.10 Fluidos de corte

As principais funções dos fluidos de corte na usinagem são: realizar a lubrificação com o objetivo de reduzir o calor gerado pelo atrito, diminuir o desgaste e o consumo de energia e ainda proporcionar um melhor acabamento na peça final.

A refrigeração tem a função de eliminar o calor sem permitir que ocorram alterações dimensionais nas peças, bem como promover a expulsão dos cavacos metálicos gerados na usinagem e, por fim, proteger máquinas e ferramentas contra a corrosão atmosférica.

A utilização de fluido de corte na usinagem dos materiais foi introduzida por F. W. Taylor em 1883. Inicialmente Taylor utilizou água para resfriar a ferramenta, depois uma solução de água e soda, ou água e sabão para evitar a oxidação da peça e/ou da ferramenta. (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2003).

Em 1868, W. H. Northcott escreveu sobre o significativo aumento na produtividade causado pelo uso de fluidos durante o corte dos materiais. Em 1883, F. W. Taylor mostrou que se poderia aumentar a velocidade de corte em 30% a 40%, utilizando água como fluido de corte. Porém, uma desvantagem da água é o fato dela causar corrosão nos materiais ferrosos. Surgiram misturas contendo óleos graxos e minerais, com o intuito de reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça. Entretanto, os óleos integrais, em virtude de sua grande lubricidade, reduzem o atrito entre a ferramenta e o cavaco, porém havendo pouca refrigeração. Na tentativa de aliar as qualidades de refrigeração e lubrificação, as emulsões e soluções foram desenvolvidas. Estas misturas (óleo e água) oxidam menos os materiais (peça e máquina) e apresentam poder lubrificante (SALES, 1999).

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Serão apresentados neste capítulo a descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos.

3.1 Material

A aplicação do ferro fundido nodular austemperado está crescendo no mundo todo devido às suas boas propriedades e versatilidade que este material apresenta. A presença de grafita em sua matriz confere a este material uma boa resistência ao desgaste devido à característica lubrificante, conseqüentemente reduzido o atrito e uma boa resistência ao impacto. Este fato se deve à forma esferoidal da grafita que evita a propagação de trincas.

Em comparação ao aço (0,3% de C), o ferro fundido nodular austemperado apresenta maior fundibilidade. Sendo que seu ponto de fusão é menor comparado com outros ferros fundidos e, portanto, utiliza menos energia para fundir o material, o que proporciona um menor custo do produto. Outra vantagem é que o ferro fundido nodular austemperado apresenta maior fluidez no seu estado líquido e uma menor concentração na solidificação, possibilitando a fabricação de peças mais complexas ou simplesmente uma otimização do sobremetal.

Ele apresenta uma ótima relação resistência/peso, significando que uma peça que é fabricada em ferro fundido nodular pode substituir muito bem uma peça que é fabricada em aço, suportando a mesma carga, mas reduzindo seu peso. O ferro fundido nodular austemperado também apresenta boa ductilidade e resistência à fadiga, portanto, ele pode ser utilizado quando a peça está sob solicitação dinâmica. São exemplos de peças fabricadas com ferro fundido nodular austemperado os virabrequins, anéis de pistões, engrenagens, pinhões, comando de válvulas, cubos de roda, peças que compõem o sistema de suspensão, etc., segundo Taborga et al. (2003), Lucas et al. (2005) e Nylén (2001).

Os corpos de provas de ADI para o torneamento foram fundidos e austemperados na SOCIESC, com a composição descrita na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química definida em porcentagem para estudo no presente trabalho.

C	Si	Mg	Mo	Mn	P
3,52	2,5	0,041	0,08	0,15	0,05
S	Cr	Ni	Al	Co	Cu
0,011	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02

Fonte: Autor, retirado dados da Sociesc, 2017

A fusão da liga foi realizada em um forno de indução a cadinho de média frequência com capacidade de 350 kg. A partir da liberação do resultado da análise de composição química, o metal líquido foi mantido à temperatura de 1485°C durante sete minutos.

A nodularização foi realizada em panela de 60 kg, com adição de Fe-Si-Mg na proporção de 1,6% (960 g). Após o tratamento de nodularização realizou-se o tratamento de inoculação com Fe-Si, na proporção de 0,6% (360 g). Em seguida foi feito o vazamento dos corpos-de-prova para obtenção das amostras. Dezesesseis corpos-de-prova do tipo cilíndrico Ø x 26 mm foram confeccionados conforme norma NBR 6916, para a realização do trabalho. As temperaturas de vazamento variaram entre 1360 e 1378°C.

As composições químicas das panelas de vazamento foram determinadas com auxílio da técnica de espectroscopia de emissão óptica. As amostras (moedas) para análise foram obtidas por meio do vazamento em coquilha. Foi retirada uma amostra para cada panela de vazamento.

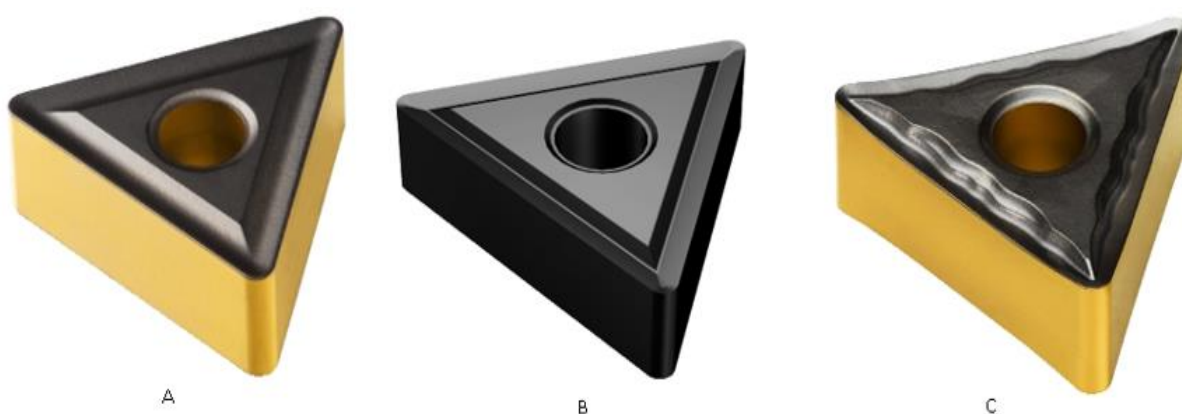
Os tratamentos térmicos de austêmpera foram realizados na área útil dos cilíndricos, em fornos tipo poço. O controle de temperatura dos banhos foi realizado com auxílio de um termopar. O procedimento adotado consistiu das seguintes etapas:

- a) Pré-aquecimento entre 450 e 500°C durante uma hora, sem banho de sais;
- b) Pré-aquecimento até 800°C durante 20 minutos, em banho de sais;
- c) Austenitização a 900°C durante três horas.
- d) Austêmpera a 350°C durante 120 minutos, em banho de sais, com posterior resfriamento ao ar.

3.2 Ferramentas

As ferramentas utilizadas foram insertos com revestimento de Nitreto de titânio alumínio (TiAlN) e Nitreto de titânio (TiN), sendo um inserto de desbaste TNMG 160408 – 4225 (Figura 10 A), um inserto de acabamento TNMG 160404 – 1105 (Figura 10 B) e um inserto de acabamento TNMG 160404 – 4215 (Figura 10 C). Estas ferramentas foram compradas na WT Ferramentas (revendedor de insertos e ferramentas para usinagem em Jaraguá do Sul e região).

Figura 10 – Insertos utilizados para desbaste e acabamento



Fonte: Sandvik, 2017

A usinagem foi realizada utilizando fluído de corte Lebasi L 52, de modo que o aquecimento produzido pelo atrito entre material e ferramenta interferisse o mínimo possível no resultado de desgaste. A velocidade e a profundidade de corte foram mantidas, apenas variando o avanço e o material da ferramenta nos ensaios. Foram utilizados quatro parâmetros de ensaios, ou seja, duas ferramentas de corte com coberturas diferentes, e dois avanços para cada ferramenta. Para cada amostra ensaiada foi utilizada uma aresta de corte diferente, para avaliar o desgaste em cada cobertura e avanço.

A profundidade de corte aplicada foi de 0,5 mm para o diâmetro da peça, pois essa era a condição mínima exigida pelo fabricante das ferramentas. Os avanços selecionados foram 0,1 mm e 0,15 mm por rotação também em função da recomendação do fabricante. Estabeleceram-se então 16 ensaios com seis repetições

para cada avanço e ferramenta, e a partir deles foi analisado o comportamento do desgaste das ferramentas e o acabamento superficial do corpo de prova.

3.3 Máquina – ferramenta

Os ensaios de torneamento, objeto deste trabalho, foram realizados em um torno horizontal convencional modelo Mascote Gold (Nardini) para desbaste dos ensaios, este instalado no laboratório da SOCIESC – Joinville, (Figura 11) e em um centro de torneamento CNC modelo GL 240 (ROMI), comando FANUC OI-TD, com potência de 25 cv, para finalizar o experimento, este instalado no laboratório do IFSC Rau – Jaraguá do Sul, (Figura 12)

Figura 11 - Máquina utilizada para o desbaste dos ensaios de torneamento



Fonte: Autor, 2017

Figura 12 - Máquina utilizada para os ensaios de torneamento



Fonte: Autor, 2017

3.4 Rugosidade

Para a avaliação da qualidade dos corpos de provas foi utilizado um rugosímetro da marca Tesa, que se encontra no laboratório do IFSC Rau – Jaraguá do Sul, (Figura 13).

Figura 13 - Rugosímetro



Fonte: Autor, 2017

3.5 Ensaio de tração

A máquina utilizada para a realização desses ensaios foi a Máquina Universal de Ensaios EMIC linha DL, com capacidade de até 10 toneladas (figura 14).

Os ensaios de tração foram feitos em temperatura ambiente de acordo com as normas e os materiais utilizados foram corpos-de-prova retirados da parte útil dos cilíndricos, após o tratamento térmico de austêmpera.

Figura 14– Máquina Universal de Ensaios EMIC



Fonte: Autor, 2017.

3.6 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza é feito em máquinas que tem um penetrador na ponta superior, que promove o “amassamento” do corpo de prova na superfície de contato. A amostra testada é deformada de maneira permanente. O resultado é acompanhado em um relógio mostrador, na parte externa da máquina.

Os ensaios mecânicos foram realizados em corpos-de-prova retirados da parte útil dos cilíndricos, após o tratamento térmico de austêmpera. Utilizou-se um durômetro de bancada da marca Wolpert (figura 15), com esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 250 kgf.

Figura 15 – Durômetro de bancada



Fonte: Site do fabricante, 2017

3.7 Ensaio de metalografia

O ensaio de metalografia envolve a etapa do preparo do corpo de prova, e posterior análise do corpo com o auxílio de um microscópio.

As amostras para análises micrografias foram retiradas da área útil dos cilíndricos, a uma distância de 50 mm da extremidade. Foram analisadas amostras brutas de fundição e austemperadas

Para o preparo dos corpos de prova, foi utilizada serra manual para corte, a máquina Embutidora Fortel 30 para embutimento da amostra, o baquelite em pó preto tipo MP 39, da Fortel como agente de liga para formação do suporte da amostra, Lixadeiras e politriz modelo PLF da Fortel (rotativa manual via úmido), para obter as

superfícies planas e polidas das amostras, Politriz Mecânica Manual MLab Pol, para polimento final dos corpos de prova, óxido de Alumina para auxiliar no polimento, Lixas de Carbetto de Silício com granulações de 320, 600 e 1200 mesh, utilizadas nesta sequência e pano metalográfico de pelo alto, além da Alumina.

A preparação metalográfica foi feita de acordo com procedimentos convencionais. Realizou-se o lixamento até a grana 1200, seguido do polimento com pasta de diamante de 1 μm . O ataque metalográfico foi realizado utilizando-se solução de Nital a 4%. Para a identificação da presença de martensita na microestrutura das ligas foi utilizado o reagente de Le Pera (1979), constituído de 50% de solução de 2g de metabissulfito de sódio em 100 ml de água 50% de solução com 4 g de ácido pícrico em 100 ml de etanol.

As microestruturas das amostras foram analisadas com auxílio da técnica de microscopia óptica (MO). Medidas de metalográfica quantitativa foram realizadas em amostras no estado bruto de fusão, nas quais se determinou o grau de nodularização e o número de nódulos. Todas as medidas foram realizadas na região central da parte útil do cilíndrico (meio raio). Utilizou-se o analisador de imagens Image ProPlus™ acoplado a um microscópio óptico Olympus GX-51 (figura 16).

Figura 16 – Microscópio ÓPTICO Olympus GX-51



Fonte: Site do fabricante

3.8 Análise de desgaste da aresta de corte

Para a realização das análises, foi utilizado um estereoscópio Zeiss modelo Stemi 2000-C (figura 17), com câmera microscópica AxioCam ERc 5s acoplada.

Figura 17 – Estereoscópio Zeiss Stemi 2000-C



Fonte: Autor, 2017

4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados sobre o comportamento dos insertos usados nos ensaios. Será mostrado um breve relato sobre a preparação dos corpos de prova do ferro fundido nodular austemperado (ADI).

Os corpos de prova tiveram que ser desbastados para obter um formato cilíndrico, já que eles vieram no formato retangular da fundição (Figura 18). Então foi feito um furo de centro em cada extremidade da peça para que ela fosse presa no torno convencional por meio de um ponta e um contra-ponta e fixada com um arrastador (Figura 19).

Figura 18 - Corpo de prova bruto e com furos de centro



Fonte: Autor, 2017

Figura 19 - Corpo de prova fixada ao torno com arrastador



Fonte: Autor, 2017

Após a furação, os dezesseis corpos de prova foram desbastados até atingir a medida de 26 mm, onde o formato que se esperava foi atingido (Figura 20 e 21). Mas ainda restava um pedaço do corpo de prova para deixar no formato cilíndrico, que foi

realizado após fazer a primeira parte, fixando-a na placa de três castanhas e desbastando a parte que restava (Figura 22).

Figura 20 - Corpo de prova parcialmente desbastado



Fonte: Autor, 2017

Figura 21 - Corpo de prova parcialmente desbastado



Fonte: Autor, 2017

Figura 22 - Corpo de prova totalmente desbastado

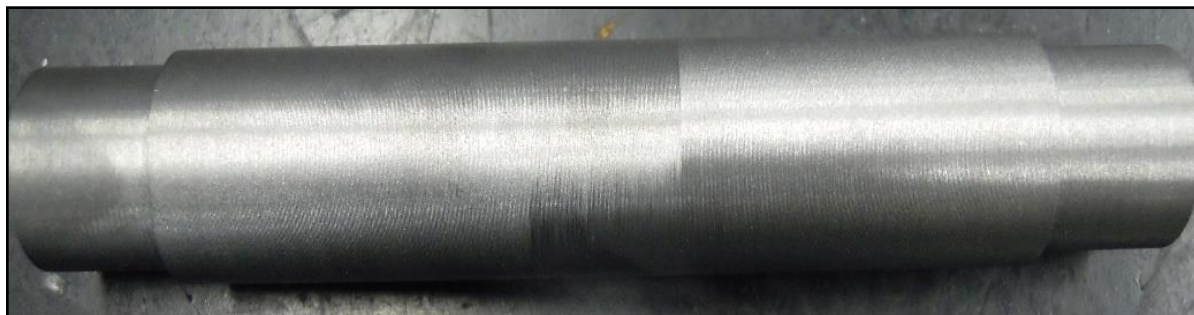


Fonte: Autor, 2017

Após a realização de todos os passos já descritos foi executado o experimento no torno CNC para avaliar a rugosidade que se espera atingir e o avanço de corte ideal para se aplicar nesse material quando for colocado em prática na produção

seriada. O programa para testar os corpos de prova foi gerado manualmente e alterado o avanço e a aresta de corte a cada peça, deixando o corpo de prova conforme a Figura 23.

Figura 23 - Corpo de prova usinado no experimento

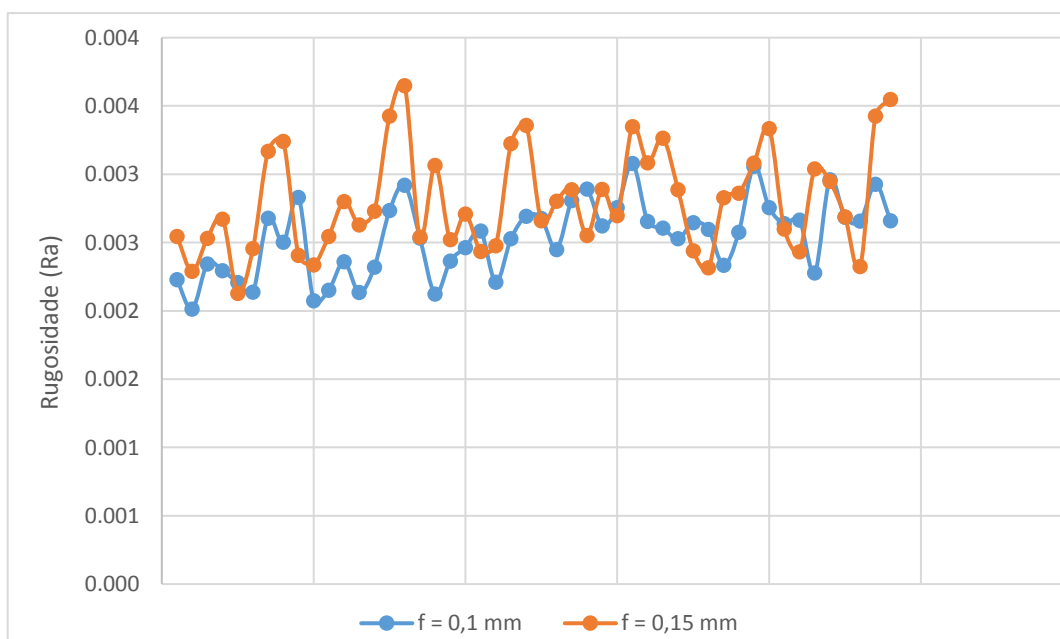


Fonte: Autor, 2017

4.1 Rugosidade

Situação 01 - Referente à rugosidade, analisando dois parâmetros de avanço de corte com ($f = 0,1$ mm e $f = 0,15$ mm) na Figura 24 observa-se que os resultados com o avanço de $f = 0,1$ mm com inserto de cobertura de Nitreto de Titânio-Alumínio apresentou melhor comportamento, obtendo uma rugosidade média de $Ra = 2,540$ μm .

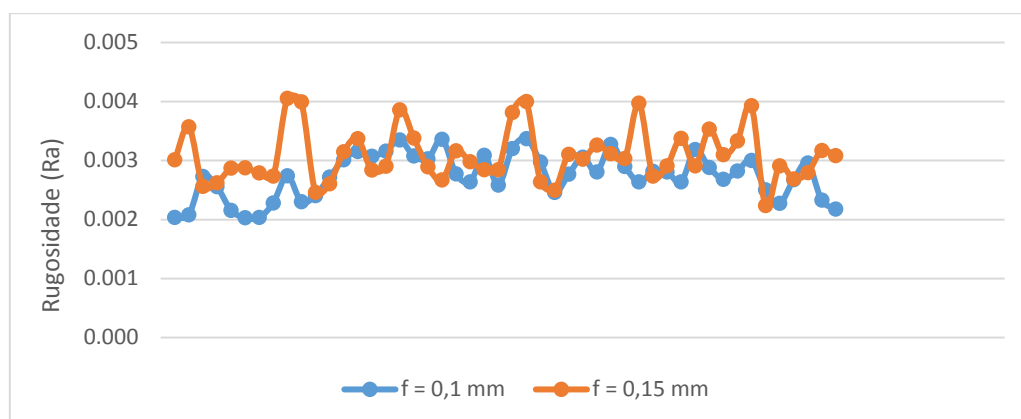
Figura 24 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço situação 01



Fonte: Autor, 2017

Situação 02 - Referente à rugosidade, analisando dois parâmetros de avanço de corte com ($f = 0,1$ mm e $f = 0,15$ mm) na Figura 25 observa-se que os resultados com a velocidade de $f = 0,1$ mm com inserto com cobertura Nitreto de Titânio apresentou melhor desempenho, obtendo uma rugosidade média de $Ra = 2,740$ μm .

Figura 25 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço situação 02



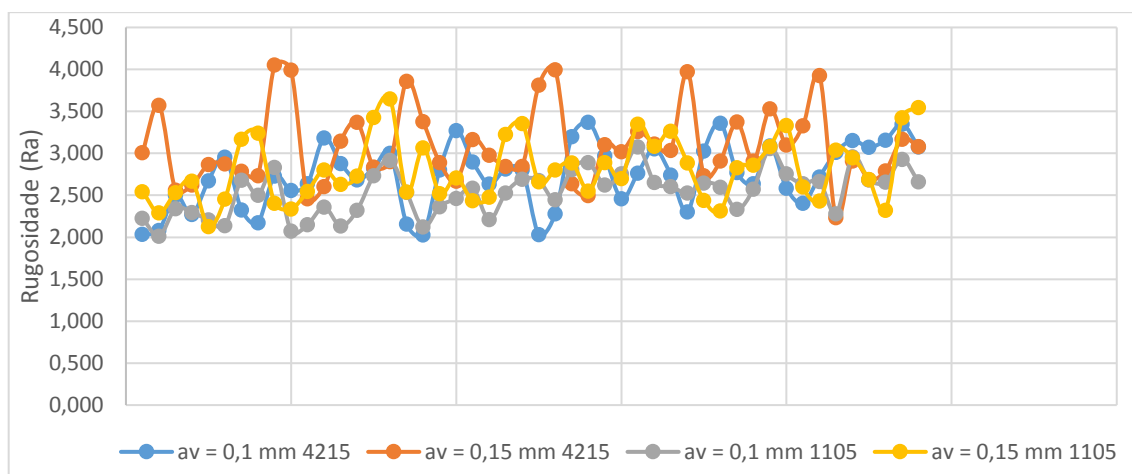
Fonte: Autor, 2017

Na Figura 26 pode ser observado o comportamento apresentado pelos quatro parâmetros avaliados (dois avanços e duas coberturas).

A partir dessa imagem, observa-se que as amostras usinadas com maior avanço apresentaram maior irregularidade de acabamento superficial.

A ferramenta com cobertura de Nitreto de Titânio-Alumínio apresentou melhor desempenho quanto a qualidade no acabamento superficial, pois teve menor oscilação nas medições de rugosidade.

Figura 26 - Gráfico comparativo da rugosidade/avanço/cobertura



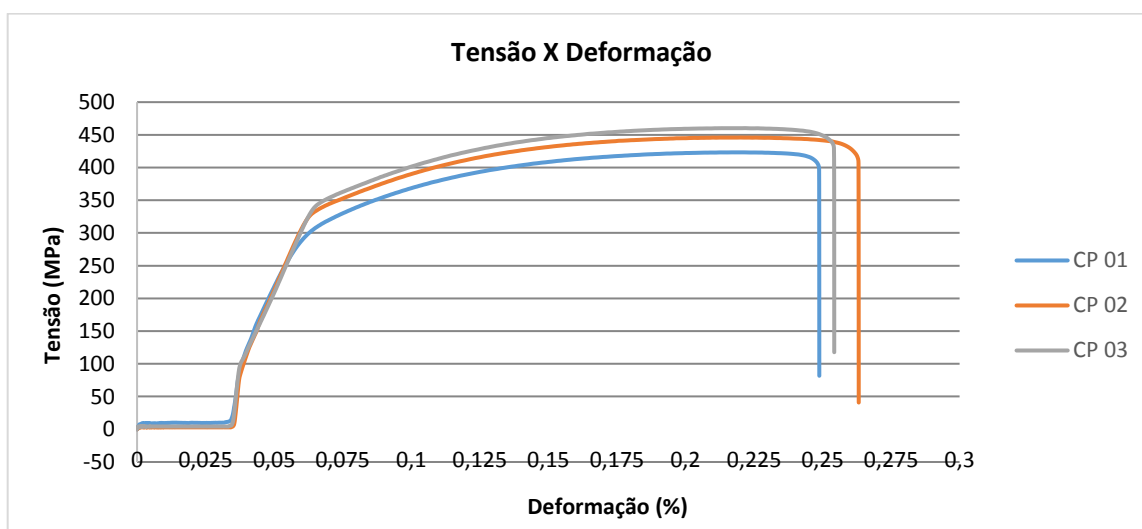
Fonte: Autor, 2017

4.2 Ensaio de tração

Após o Ensaio de tração observou-se que os corpos de prova apresentaram fratura do tipo dúctil, caracterizada pela ocorrência de uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca.

Através do gráfico Tensão X Deformação (figura 27), foi possível calcular o limite de escoamento, limite de resistência a tração e tensão a fratura. Todos os cálculos feitos estão apresentados na tabela 4. Observando o gráfico, pode-se notar que os corpos de prova sofreram alongamento considerável, mostrando uma deformação dúctil. Os corpos de prova apresentaram comportamentos similares, diferenciando apenas a porcentagem de deformação de um para outro.

Figura 27 - Gráfico Tensão X Deformação



Fonte: Autor, 2017

Tabela 4 – Propriedades calculadas para os corpos de prova

Propriedades calculadas	Tensão Máxima (σ_{mas})	Tensão a Fratura (σ_f)	Tensão de Escoamento (σ_e)	Deformação (ϵ)
CP1	423	298	130,9	21
CP2	446	328	122,9	23
CP3	460	335	117,5	22
	Mpa	Mpa	Mpa	%

Fonte: Autor, 2017

De acordo com as propriedades encontradas, podem-se observar diferenças quanto aos valores encontrados na literatura. Estes erros podem ter sido ocasionados pelo mau posicionamento do corpo de prova ou má calibração da máquina de ensaio.

Conforme será discutido nos próximos capítulos, durante o ensaio de metalografia pôde-se observar que na matriz do material houve segregação de elementos de liga, sendo uma das resultantes desse fenômeno a instabilidade na formação do grão esperado pelo tratamento térmico. Essa instabilidade encontrada na microestrutura pode ter interferido nos resultados que eram esperados para este ensaio.

4.3 Ensaio de dureza

Nesse experimento, utilizou-se o método de ensaio Rockwell. Como penetrador, foi utilizada esfera com diâmetro de 2,5mm. Foi aplicada uma pré-carga de 10kg para aproximação da esfera. Após a aproximação, foi aplicada uma carga de 250 Kgf.

Foram executados ensaios com três corpos de prova fabricados em ferro fundido nodular austemperado.

Foram realizadas medidas de dureza em 20 pontos para cada corpo de prova. O valor de dureza média entre 353 – 390 HB.

Na Tabela 5 pode-se observar as propriedades mecânicas de alguns tipos de ADI:

Tabela 5 - Tipos de ADI segundo especificação ASTM-A897-90

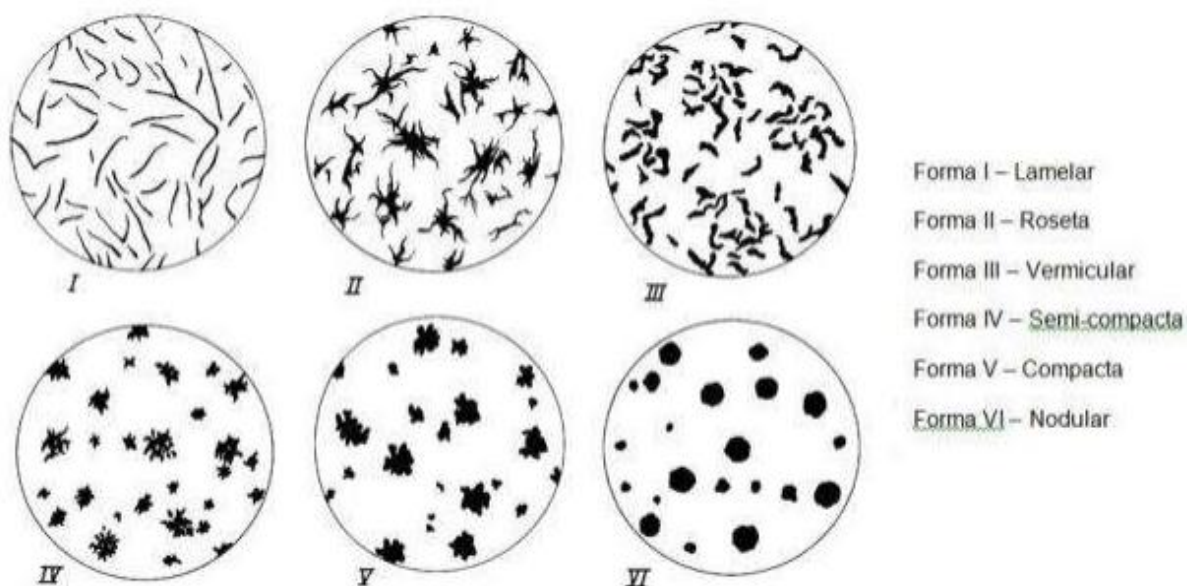
Tipo	σ_{TS} (MPa)	σ_Y (MPa)	Alongamento (%)	ECV (J)*	HB Brinell
1) 850/550/10	850	550	10	100	269-321
2) 1050/700/7	1050	700	7	80	302-363
3) 1200/850/4	1200	850	4	60	341-444
4) 1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477
5) 1600/1300/-	1600	1300	-	-	444-555
* Resistência ao impacto à temperatura ambiente (charpy sem entalhe)					

De acordo com os resultados obtidos, pode-se dizer que os materiais ensaiados condizem com os valores da literatura, já que a dureza obtida foi superior aos valores esperados para o material bruto e dentro da faixa de durezas esperada para o ADI.

4.4 Análise de micrografia

A Figura 28 evidencia o padrão de comparação conforme norma CEN EN ISO 945:1994:

Figura 28 - Classificação quanto a formas da grafita

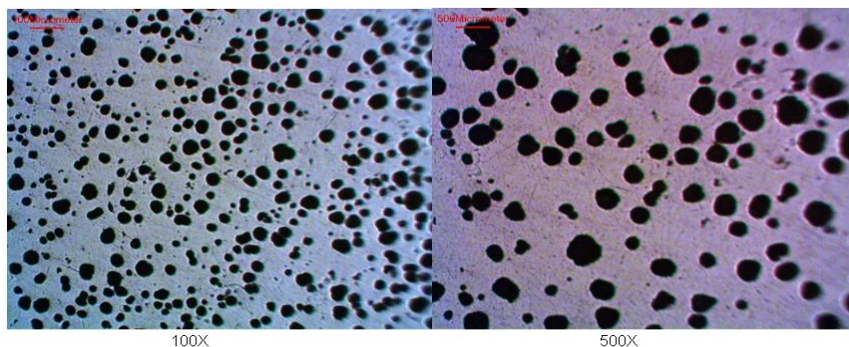


Fonte: ISO 945, 1994

Através da análise metalográfica é possível determinar a classificação dos materiais e sua composição física, química e mecânica.

Todas as amostras apresentaram o mesmo tipo de grãos, onde é possível observar os nódulos de grafita bem definidos (figura 29). Os nódulos de grafita servem como uma reserva de carbono durante as etapas de tratamentos térmicos no ferro fundido nodular, e atribuem melhoras nas propriedades mecânicas do material.

Figura 29 - Vista microscópica do ferro fundido nodular austemperado sem ataque.

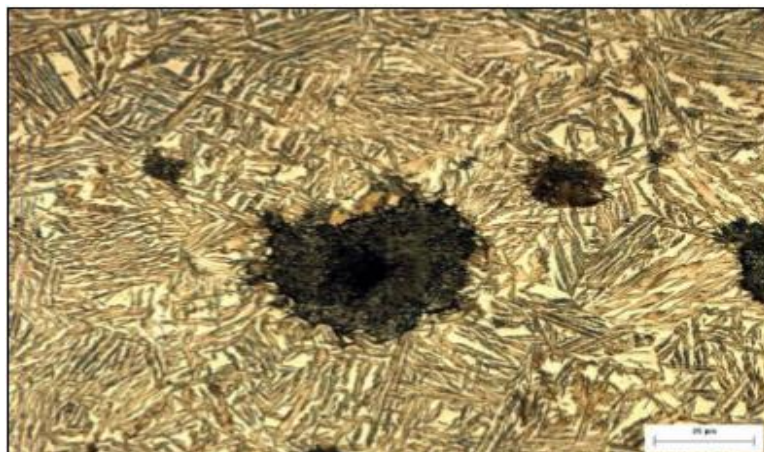


Fonte: Autor, 2017

O material estudado mostrou-se compatível com as micrografias encontradas na literatura, caracterizando ferro fundido nodular.

As microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos de austêmpera a 350°C são apresentadas na Figura 30. Todas as amostras foram atacadas com reagente de Le Pera, que ataca diferencialmente a martensita e as agulhas de ferrita acicular. Verifica-se na Figura 30, a microestrutura é composta predominantemente por uma mistura de ferrita acicular e austenita estabilizada.

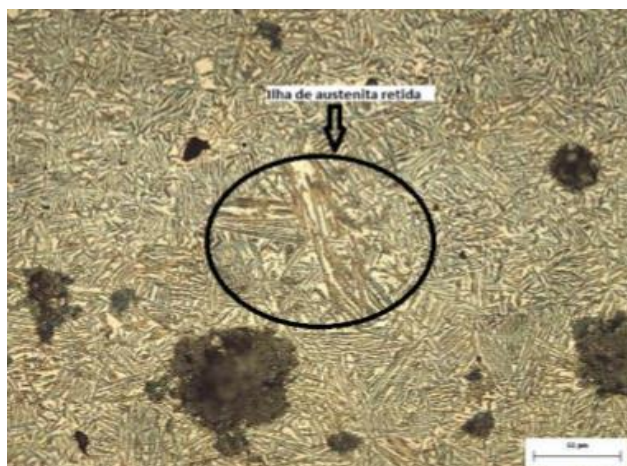
Figura 30 - Microestruturas de amostras austemperadas 1000X



Fonte: Autor, 2017

A amostra da Figura 31 apresentou pequenas quantidades de martensita, localizadas em regiões intercelulares, nas proximidades dos nódulos de grafita e/ou em ilhas de austenita localizadas entre agulhas de ferrita acicular. Estes são indícios de ocorrência do fenômeno de segregação de elementos de liga, tanto para os nódulos como para os contornos de células eutéticas, e de que a austenita nestas regiões ainda não estava estabilizada.

Figura 31 - Microestruturas de amostras austemperadas 500X



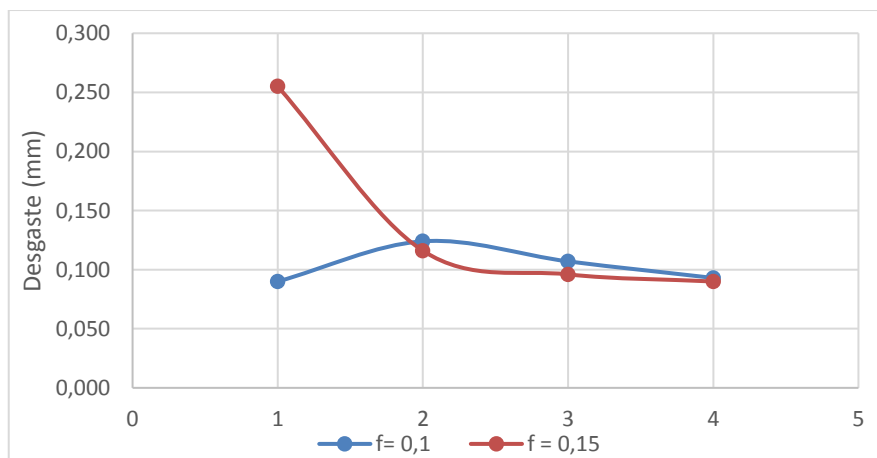
Fonte: Autor, 2017

Na região central da micrografia da Figura 31 existem ripas de martensita (cor alaranjada e contornos mais retilíneos) em meio a ilhas de austenita retida. Vale mencionar que nada se pode afirmar sobre a variação nas quantidades de austenita retida e de martensita e/ou ferrita acicular, em função do tempo de austêmpera.

4.5 Desgaste de flanco

Situação 01 – Analisando oito arestas de corte, quatro de cada avanço utilizado ($f = 0,1\text{mm}$ e $f = 0,15\text{mm}$) de inserto com cobertura de Nitreto de titânio, observou-se que no avanço de corte de $f = 0,1\text{mm}$ houve menor desgaste da ferramenta, conforme Figura 32.

Figura 32 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 01

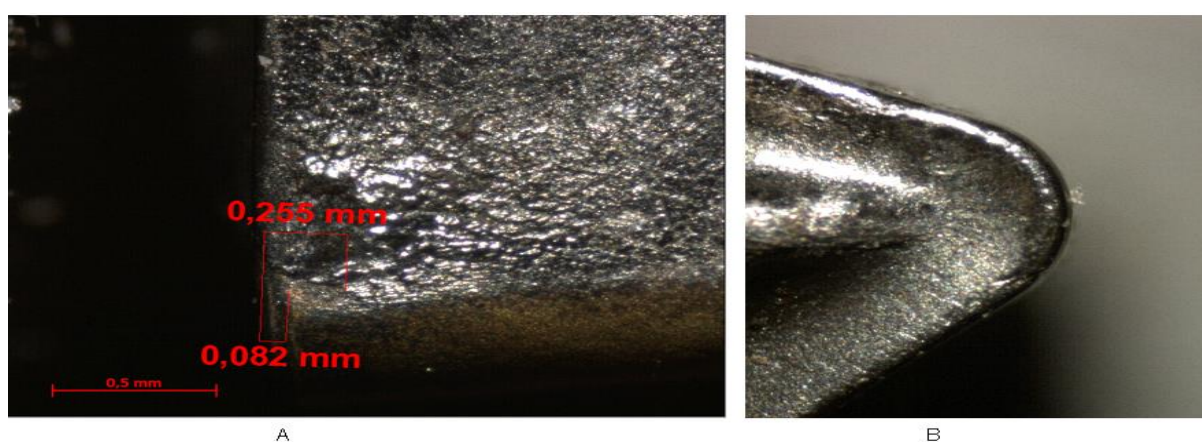


Fonte: Autor, 2017

Na utilização de avanço 0,15 mm, um dos flancos apresentou desgaste atípico (figura 32 f= 0,15 ponto 1).

Observando a estereoscopia da aresta, pode-se verificar que houve um lascamento na zona de corte (figura 33 A) e desgaste por adesão (figura 33 B). Estes podem ter ocorrido devido a alguma condição instável durante o processo de torneamento, ou ainda por alguma inclusão de areia na microestrutura do corpo de prova.

Figura 33 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 01



Fonte: Autor, 2017

Avaliando a interferência dessa situação no acabamento superficial da amostra torneada pela aresta danificada (tabela 6), não houve interferência significativa, visto que houveram medições com rugosidade menor inclusive nos últimos passes testados.

Tabela 6– Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 01

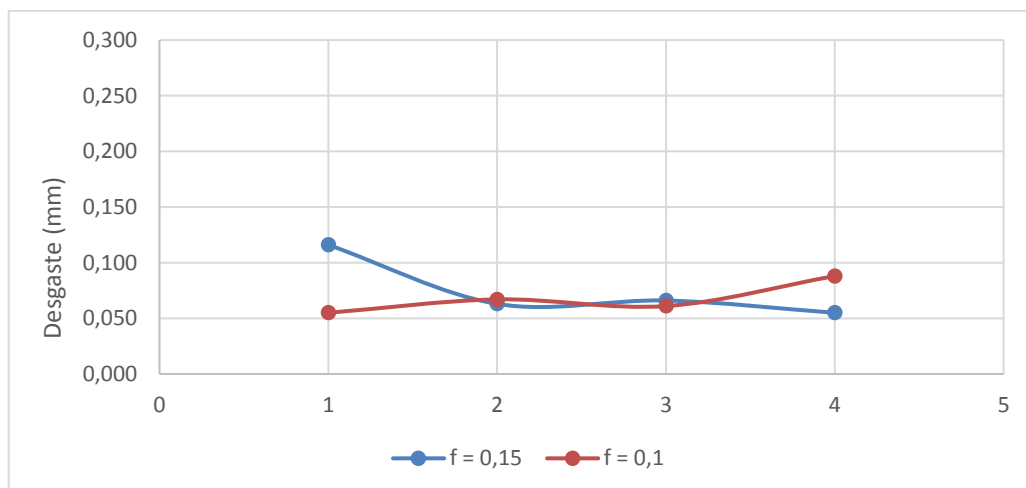
	Avanço	Ferramenta	Passe 01	Passe 02	Passe 03	Passe 04	Passe 05	Passe 06
			Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
Peça 02	f = 0.15	4215	3,010	4,052	3,860	3,814	3,034	3,330
			3,572	3,993	3,378	3,998	3,973	3,927

Fonte: Autor, 2017

Situação 02 – Analisando oito arestas de corte, quatro de cada avanço utilizado (f = 0,1mm e f= 0,15mm) de inserto com cobertura de Nitreto de titânio-alumínio,

observou-se que no avanço de corte de $f = 0,1$ mm houve menor desgaste da ferramenta, conforme Figura 34.

Figura 34 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 02

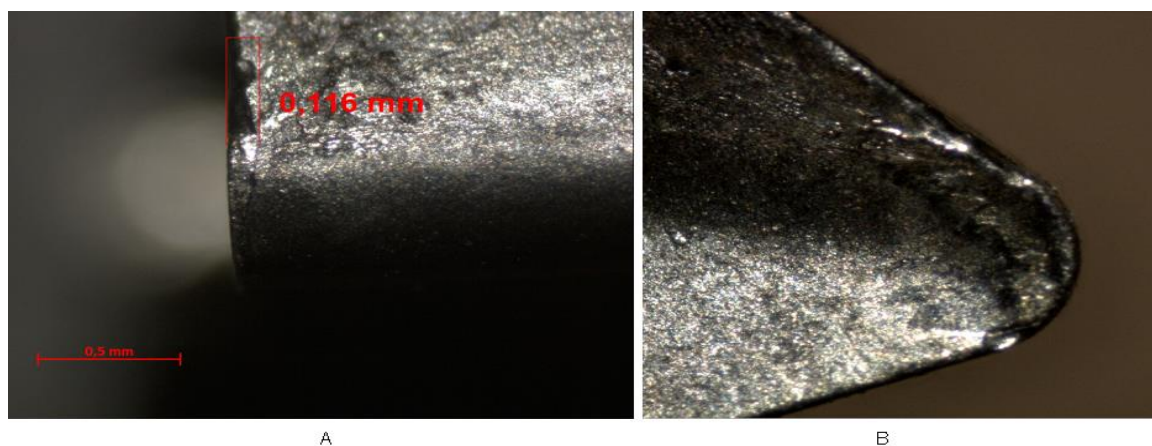


Fonte: Autor, 2017

Tanto na utilização de avanço 0,1 mm quanto no avanço 0,15 mm, um dos flancos apresentou desgaste atípico (figura 34 $f = 0,15$ ponto 1 e $f = 0,1$ ponto 4).

Observando a estereoscopia das duas arestas em questão, pode-se verificar que para a aresta utilizada em torneamento com 0,15 mm de avanço, também houve lascamento na zona de corte (figura 35 A). Na região de saída de cavaco, houve um encruamento da cobertura do inserto (figura 35 B), podendo ter sido ocasionado por um superaquecimento durante o torneamento.

Figura 35 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 - $f = 0,15$ mm



A

B

Fonte: Autor, 2017

Avaliando a interferência dessa situação no acabamento superficial da amostra torneada pela aresta danificada, não houve interferência significativa, visto que houveram medições com rugosidade menor inclusive nos últimos passes testados, conforme demonstra tabela 7.

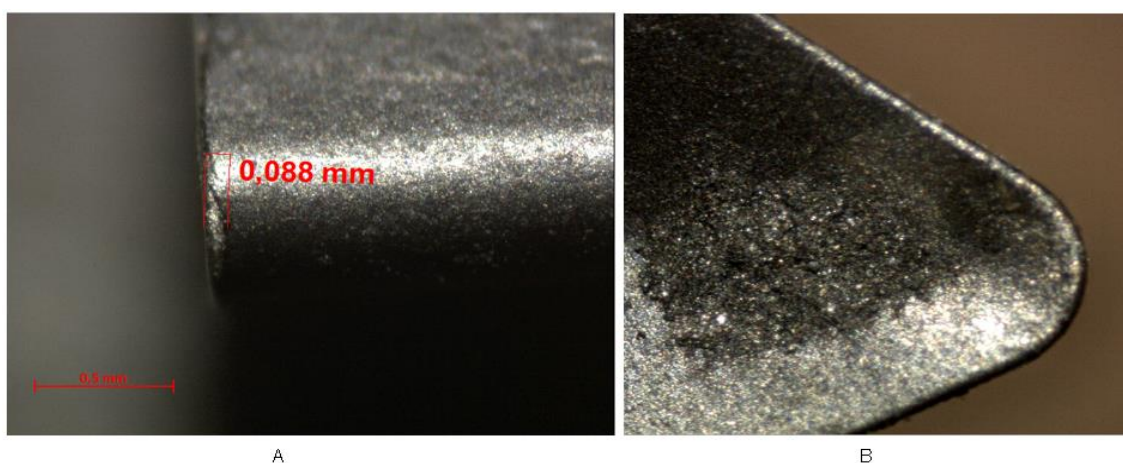
Tabela 7 – Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 – $f = 0,15\text{mm}$

	Avanço	Ferramenta	Passe 01	Passe 02	Passe 03	Passe 04	Passe 05	Passe 06
			Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
Peça 03	$f = 0.15$	1105	3,169	3,427	3,225	3,348	3,081	3,425
			3,242	3,648	3,357	3,084	3,334	3,547

Fonte: Autor, 2017

Já para a aresta utilizada em torneamento com avanço de $f = 0,1\text{ mm}$, não houve nenhuma situação além do desgaste do flanco de corte. Apesar do pico demonstrado no gráfico (figura 34 $f = 0,1$ ponto 4) não ter sido tão significativo, comparada às demais situações testadas esta apresentou atipicidade. Pode-se dizer que houve um desgaste mais acentuado do flanco, que pode ter sido ocasionado por alguma inclusão na microestrutura do material.

Figura 36 – Estereoscopia aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 - $f = 0,10\text{mm}$



Fonte: Autor, 2017

Avaliando a interferência dessa situação no acabamento superficial da amostra torneada pela aresta danificada, não houve interferência significativa, visto que

houveram medições com rugosidade menor inclusive nos últimos passes testados, conforme tabela 8.

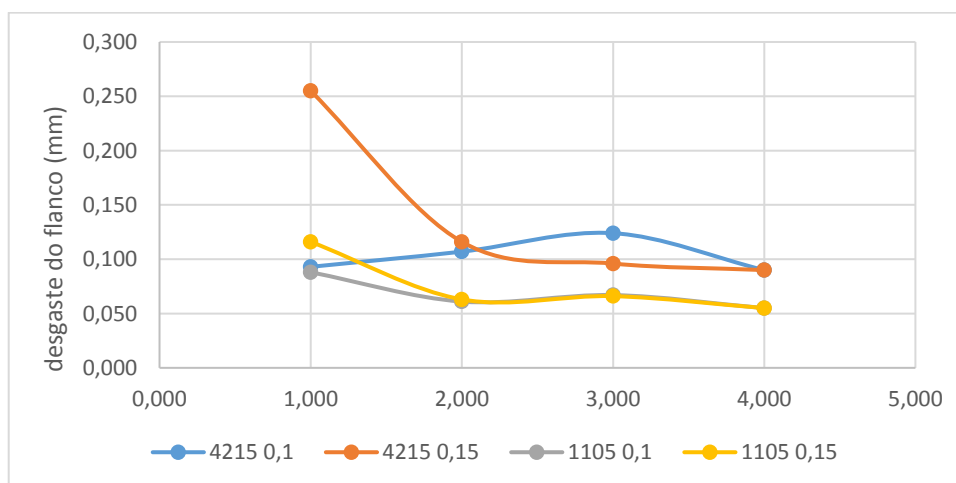
Tabela 8– Rugosidades medidas durante torneamento utilizando aresta de corte com desgaste atípico para situação 02 – $f = 0,1\text{mm}$

	Avanço	Ferramenta	Passe 01	Passe 02	Passe 03	Passe 04	Passe 05	Passe 06
			Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
Peça 04	$f = 0,1$	1105	2,679	2,734	2,528	3,079	3,058	2,928
			2,502	2,919	2,693	2,655	2,757	2,660

Fonte: Autor, 2017

Analisando o desgaste dos dois tipos de cobertura versus avanço de corte utilizado (figura 37), pode-se afirmar que os insertos com cobertura de Nitreto de titânio-alumínio apresentou menor desgaste do flanco de corte, tanto em avanço 0,1 mm quanto em avanço 0,15 mm.

Figura 37 - Gráfico comparativo do desgaste de flanco situação 02



Fonte: Autor, 2017

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento decorrente do processo de torneamento do ADI com base em parâmetros de usinagem específicos. Foi avaliada também a influência da microestrutura do ADI em função da usinabilidade do material. Todos os ensaios realizados apresentaram comportamentos únicos e específicos para os parâmetros adotados, pois estes interferem diretamente nos resultados obtidos.

Desde modo, com a interpretação dos resultados obtidos, o presente estudo permitiu concluir que o avanço de corte ideal para o inserto de Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) é 0,1 mm/rot para uma velocidade constante de 80m/min, utilizando fluido de corte. Com estes parâmetros obteve-se um menor desgaste no flanco de corte da ferramenta e melhor qualidade superficial no acabamento.

Sugere-se que ao fazer a utilização destes parâmetros de usinagem em produção de peças, seja verificado o acabamento superficial esperado, e se necessário fazer ajustes nos parâmetros de usinagem: tanto a velocidade de corte quanto o avanço.

Recomenda-se que para estudos adicionais sejam utilizadas outras coberturas no inserto, velocidades de cortes e avanços diferentes dos quais foram utilizados nesse estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A 897M-90: Standards specific for austempered ductile iron casting [Metric] 1. West Conshohocken, 1997.

AUSTEMPERED ductile-iron castings - advantages, production, properties and specifications. Materials & Design, 2009.

BAPTÍSTA, A. L. B. - O Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade, UFF/EEIMVR, 1998.

BATES, C. Production and Machining of ductile cast iron. In: ABSTRACT FROM DE DIS MEETING. Proceeding of the AFS Iron Inoculation Conference, Shaumburger, Illinois, USA, June, 2000.

BOUZAKIS, K.D.; VIDAKIS, N., MICHAILIDIS, N., LEYEDECKER, T., ERKENS, G., FUSS, G. Quantification of properties modification and cutting performance of (TiAl)N coating at elevated temperatures. Surface and Coating Technology, 1999.

BRANCO, C.A.G.M. Mecânica dos materiais. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

CAKIR M. C. et. al., The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron, Materials Science and Engineering A 407, 2008.

CAKIR, M. C. , ISIK, Y. Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times Materials. Materials and Design 29, 2007.

CALLISTER Jr., W. D. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

CARMO, D. J. do., Ferro Fundido nodular Austemperado ADI. Itaúna: Senai, MG. 2001.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 6ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.

CARMO, D.J.; DIAS, J.F. Ferro fundido nodular austemperado ADI. Itaúna: SENAI DR MG, 2001.

COUTINHO, Telmo de Azevedo. Metalografia de Não-Ferrosos, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1980.

CUEVA-GALÁRRAGA, Edison Gustavo; TSCHIPTSCHIN, André P. Transformação martensítica induzida por deformação em ferros fundidos nodulares austemperados. ABM, Belo Horizonte, 1998.

DIAS, J. F. Estudo do comportamento à fadiga em ferro fundido nodular austemperado (ADI) sujeito a carregamentos de amplitude variável. 2006. Tese (Doutor) - Curso de Escola de engenharia, Departamento de Engenharia De Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, São Paulo, 2006.

DIETER, G. Metalurgia mecânica: 1a Edição, Rio de Janeiro, Guanabara dois, 1982.

DINIZ, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, Art Liber Editora, Brasil, 2000.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo, Artliber, 2003.

DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, A.J. , Uma comparação do processo sem fluido e com fluido em abundância utilizando pastilhas alisadoras, Máquinas e Metais, 2006.

FACCIO, I. Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2002.

FERRARESI, Dino. Fundamento da usinagem dos metais. São Paulo. Edgar Blücher. 1977.

GARCIA, A. et alli. Ensaios dos materiais: 1ª Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2000.

GODEFROID, L.B. Cândido, L.C. Curso análise de falhas, ABM, 2010.

GOODRICH, G. M. Descobrimo o caminho para soluções de usinabilidade de ferro fundido, Estudo de caso 2 – Revista Fundição & Matérias-Primas, nº 66 – junho 2005.

GUESSER, Wilson Luiz. Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos. São Paulo: Editora

Blucher, 2009.

HARDING, R.A., Ferrous materials used for gears – a review, 1986.

ISCAR LTD., Conceitos básicos de usinagem, catálogo de ferramentas, 2001.

JESUS FILHO, Edson Souza de. Processamento, Usinagem, e desgaste de ligas Sintetizadas para aplicações automotivas. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – USP, 2006.

KEIGHLEY LABORATORIES LTDA, Austempered Ductile Iron, Keighley Laboratories Ltd. Disponível em <http://www.keighleylabs.co.uk/adi.html>. Acesso em Abril, 2017.

KENNAMETAL, Mostra de ferramentas para usinagem de autopeças, 2009.

KLOCKE, F.; KLÖPPER, C., Característica da usinagem do ferro fundido nodular austemperado, Máquinas e Metais, 2006.

KLOCKE, F.; Klöppe, C.; Lung, D. and Essig, C., “Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI)”, CIRP vol. 56, 2007.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren. 5 ed. Berlin: Springer, 1997.

LAHRES, M.; GRÜNER, M.; MOHRDIECK, C. e BAUER, H. Strategies for Processing, New Engineering Materials for Automotive Powertrain Components, DAIMLERCHRYSLER, Ireland, 2008.

LUCAS, E.O.; WEINGAERTNER, W.L.; BERNARDINI, P.A.N. “Como o cavaco se forma no torneamento do fofo nodular ferrítico”, Máquinas e Metais, 2005.

LUSSOLI, R. J. Efeitos da Adição de Cobre e da Seção da Peça Sobre as Características Microestruturais e Mecânicas de Ferro Fundido Nodular Austemperado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, 2003

MAGALHÃES, Luis Manuel Martins Leite de. Caracterização tribologica de um ferro nodular

austemperado em ensaios disco-disco e engrenagens FZG, Universidade do Porto, 2002.

MASON, F., Os conceitos que guiam a indústria no desenvolvimento de pastilhas indexáveis, Máquinas e Metais, 2003.

METALS HANDBOOK. Casting, 9th ed. American Society form Metals International, vol. 15, 1988.

MEYER, M.A, Chawla, K.K. Princípios de metalurgia mecânica: 1a Edição, São Paulo, Edgard Blucher, 1982.

MICHELETTI, G. F. Mecanizado por arranque de viruta. 2ª Edição, Barcelona: Editorial Blume, 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014/view>. Acesso em: Maio, 2017.

MORRISON, J. Os 50 anos do Ferro fundido Nodular e do Níquel. Revista Fundição e Serviços: São Paulo, nº. 91, 2000.

MULLINS, J. D., Engineering properties, specifications and physical constants of specific ductile irons, in Ductile Iron Handbook, American Foundryman Society Inc., Illinois, USA, 1992.

NBR 13284. Preparação de corpos de prova para análise metalográfica. ABNT, abr. 1995.

NBR 6916. Ferro fundido nodular e ferro fundido com grafita esferoidal. ABNT, out. 1981.

NÉRI, M. A.; CARREÑO,C. Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron, Materials Characterization, v. 51. September 2003.

NICOL, G. Development of a New Techology for the Production of Near Net Shape ADI-Parts, Centro Ricerche FIAT, Ireland, 2008.

NM 187-1:99, Materiais metálicos – Dureza Brinell, parte 1: medição da dureza Brinell. ABNT, 1999.

NYLÉN, T., Niobium in Cast Iron, International Symposium on Niobium 2001, Orlando FL, USA, 2–5 Dec. 2001.

ROSA, S.N. Influência do teor de titânio no torneamento do ferro fundido vermicular- Dissertação de Mestrado - Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP), Campinas, 2009.

SALES, W. F. Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte. Uberlândia. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

SANTOS S. et al. Tribological characterization of PVD coatings for cutting tools. Surface and Coatings Technology, 2004.

SEAH, K. H. W. and Sharma, S.C., “Machinability of alloyed austempered ductile iron”, Int. J. Mach. Tools Manufact, 1994.

SEKER, Ulvi; Ibrahim Ciftci; Hasan Hasirci. The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron. Materials and Design, 2003.

SEKER, Ulvi; HASIRCI, Hasirci, Evaluation of Machinability of Austempered Ductile Irons in Terms of Cutting Forces and Surface quality, Journal of Processing Technology, 2006.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte I. 5ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. Ferramentas de corte I. 6ª edição – Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

SILVA, Daniele da. Caracterização Macroestrutural e mecânica de um Ferro Fundido Nodular Austemperado, Trabalho de obtenção de Grau de Bacharelado em Engenharia de Fundição, Instituto Superior Tupy – IST, 2006.

SOREMETAL, A Design Engineer's Digest of Ductile Iron. Publisher Rtz Iron & Titanium America, 8th.edition, Montreal, 2002.

SOUZA, S.A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: 5a Edição, São Paulo, Edgard Blucher, 1982.

SOUZA, André João de. Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2004.

TABORGA, A.R.M.; TABORGA, J.D.M.; WEINGAERTNER, W.L. “Análise da Rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolos de SiC e Al₂O₃, 2º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia – MG, 2003.

TOKTAS, G.; TAYANC, M. and TOKTAS, A., “Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron”, Materials Characterization, 2006.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. Processos de usinagem e ferramentas de corte. Florianópolis: UFSC, 2000.