

INVESTIGAÇÃO DA USINABILIDADE DE FERROS NODULARES PRODUZIDOS POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA, EM DIFERENTES BITOLAS

José Aécio Gomes de Sousa, aeciosousa@yahoo.com.br

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br

Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br

Resumo: A fundição contínua representa uma importante alternativa na fabricação de peças de ferro fundido. O produto resultante deste processo de fabricação é mais longo do que o molde, possibilitando, assim, a fabricação de barras nas mais variadas geometrias, e que, posteriormente, serão usinadas. Entretanto, tem-se dúvidas que este tipo de processo de fabricação produz uma heterogeneidade ao longo da seção transversal da peça fabricada, devido a velocidades de resfriamentos distintas do núcleo da periferia, o que pode ocasionar diferentes níveis de usinabilidade ao longo da seção transversal do material fundido. O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento da usinabilidade ao longo da seção transversal de barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua em diferentes bitolas. Também será verificada a correlação das variáveis que controlam a usinabilidade e a respectiva resposta das propriedades mecânicas.

Palavras-chave: fundição contínua, ferro fundido nodular, usinabilidade

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais está relacionado com o custo e a “eficiência/peso”. No esforço de alcançar estas exigências empregam-se novos materiais com resistência similar, mas com baixa densidade ou aumenta-se a resistência de materiais tradicionais por meio da adição de elementos de liga ou por tratamento térmico (PETRY, 1999). A escolha depende de parâmetros tais como carregamentos mecânico e térmico ou condições de contorno como custos de manufatura, reciclagem, aceitação do público e usinabilidade (KLOCKE et al., 2007). Nesta lista, englobam-se os ferros fundidos que, quase sempre, oferecem boa usinabilidade e baixo custo de produção (BARBOSA et al., 2007).

Juntamente com os aços, os ferros fundidos são os materiais mais utilizados pela indústria, sendo aplicados em diversos setores, não só devido às suas características inerentes, como também sua imensa versatilidade (DAWSON e SCHOROEDER, 2004). Os ferros fundidos podem apresentar diversas características mecânicas, dependendo dos elementos de liga presente ou do tratamento térmico submetido (GUESSER, 2009). Em qualquer ferro fundido, a característica microestrutural de efeito significativo nas propriedades físicas e mecânicas é a presença de grafita pura (TELES, 2007). A grafita possui resistência mecânica muito baixa (GOODRICH, 2003 citado por GUESSER, 2009).

O avanço em pesquisas de ferros fundidos tem recebido importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Tais desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação, ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (GUESSER et al., 1997). A grande aplicação dos ferros fundidos em peças automotivas (tambores de freio, coletores de escapamento, cabeçotes e, principalmente, blocos de motores, incluindo os motores diesel) dá origem à necessidade de um aprimoramento em pesquisas, com o objetivo de melhor entender o desempenho destes materiais perante aos diversos tipos de processos de fabricação (GHANI et al., 2002; SHARMAN et al., 2001).

A preocupação de toda a indústria de transformação é produzir peças funcionais e de baixo custo. A forma de qualquer peça é definida pela sua aplicação e pelo seu processo de obtenção (FATAHALLA e HUSSEIN, 1996). No processo de fundição convencional, tem-se o setor de modelação, o setor de moldagem, o setor de macharia, para, então, chegar ao setor de fusão e, posteriormente, ao de usinagem (JAVAID et al., 2000). O processo de fundição contínua é uma alternativa interessante na produção de componentes com geometria simples (perfis redondos, quadrados, retangulares, entre outros). Este processo apresenta custo de moldagem muito inferior aos processos de fundição em areia, pois os perfis utilizam uma matriz de grafite refrigerada que determina sua forma final. Porém, os componentes sofrem uma usinagem intensa para atingir seu formato final (DAWSON e WURTEMBERG, 1994; MARWANGA et al., 1999; FUCO, 1998).

Em perfis produzidos por fundição contínua, deseja-se que o material na superfície apresente uma elevada usinabilidade, enquanto que o material no núcleo da barra deve apresentar propriedades mecânicas que sejam suficientes para resistir às solicitações ao que o mesmo é submetido.

Para manter a competitividade, muitas empresas estão investindo em tecnologia para orientar os trabalhos industriais. Os custos relativos aos materiais industriais estão sendo reduzidos por efetivos controles de qualidade e a correta especificação de materiais. Expressar informações quantitativas de ferros fundidos nodulares como as características da grafita, presença de carbonetos, perlita e outros constituintes em termos de seus próprios volumes, fração em volume, tamanho, forma, espaçamentos e distribuição são essenciais na competitividade industrial, pois, dessa forma, garantem um material de qualidade e, por consequência, a satisfação do cliente.

A realização deste trabalho, que será de natureza científica e tecnológica, é justificada por não existir muitas pesquisas publicadas sobre usinagem de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua e, principalmente, por não encontrar na literatura trabalhos direcionados ao estudo que esta tese propõe, isto é, determinar a variação de usinabilidade ao longo da seção transversal de barras fundidas.

O objetivo geral deste trabalho é verificar o comportamento da usinabilidade ao longo da seção transversal de barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua em diferentes bitolas. Também será verificada a correlação das variáveis que controlam a usinabilidade e a respectiva resposta das propriedades mecânicas.

Ao longo dos testes, serão realizados ensaios de furação constante, torneamento e fresamento. Os parâmetros avaliadores serão: evolução do desgaste da ferramenta, vida da ferramenta, rugosidade superficial, forças de usinagem e potência efetiva de corte.

Os testes irão proporcionar resultados que permitirão a comparação da usinabilidade ao longo da seção transversal de uma mesma bitola, além de possibilitar detectar possíveis variações de usinabilidade entre as diferentes bitolas do material. Todos os testes serão realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. GENERALIDADE DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os ferros fundidos são uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,1 % em peso; na prática, entretanto, muitos ferros fundidos contêm entre 3,0 e 4,5 %C em peso e, em adição, outros elementos de liga (CALLISTER, 2006). Segundo Guesser (2009), além dos elementos Fe, C e Si, os ferros fundidos ainda contêm Mn, S e P, em sua estrutura, podendo, em alguns casos, ser adicionados outros elementos. Chiaverini (2005) define ferro fundido como: “ligas de ferro/carbono/silício de teores de carbono acima de 2 %, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita”.

Nos últimos anos o desenvolvimento em pesquisas sobre os ferros fundidos colaboraram para que este material oferecesse uma maior concorrência em relação aos aços (GRZESIK et al., 2009). Os ferros fundidos podem apresentar diversas características mecânicas, dependendo dos elementos de liga presente ou do tratamento térmico submetido (GUESSER, 2009).

Os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias, principalmente de acordo com a forma da grafita. O nome de cada família às vezes reflete a forma da grafita (nodular, vermicular), outras vezes tem relação com o aspecto da fratura (cinzento, branco) ou com alguma propriedade mecânica relevante (maleável) (GUESSER, 2009; SINTERCAST, 2001; MOREIRA et al., 2004).

Os elementos que mais influem na estrutura dos ferros fundidos são o carbono e o silício (CALLISTER, 2006). O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente o elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro (sua presença, independente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou para o branco). O manganês, sempre presente, tem efeito oposto ao do silício, ou seja, estabiliza a cementita e, assim, contrabalança, de certo modo, a ação grafitizante do silício. Os outros elementos (impurezas normais, fósforo e enxofre) não têm uma ação muito significativa sob o ponto de vista de tendência grafitizante. Apenas o fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro, sua principal função é na estrutura do material, porque forma com o ferro e o carbono um composto de natureza eutética (carboneto de ferro e fosfeto de ferro) de aparência branca e perfurada, chamada de steadita (CHIAVERINI, 2005; GHANI et al., 2002).

As propriedades mecânicas como resistência, ductilidade e módulo de elasticidade, assim com as propriedades físicas (condutividade térmica e capacidade de amortecimento, por exemplo), dependem fortemente da estrutura e da distribuição dos constituintes microestruturais (DEGARMO et al., 1997). Em qualquer ferro fundido, a característica microestrutural de efeito significativo nessas propriedades é a presença de grafita pura (OLIVEIRA, 2008). A adição de elementos de liga proporciona alterações na microestrutura do ferro fundido, fazendo com que o mesmo tenha um aumento de 20 – 25 % na resistência a tração e dureza, além de um acréscimo de 5 – 10 % no módulo de elasticidade e resistência à fadiga (REUTER et al., 2001). Segundo Doré (2007), a inoculação, que consiste na adição de um elemento

químico (mais comumente o silício) no metal quando ainda está no estado líquido, no próprio forno, afeta fortemente a formação da grafita nos ferros fundidos, aumentando, assim, a tendência à grafitização.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os ferros fundidos nodulares têm sido influenciados por um número de desenvolvimentos técnicos que tem resultado nas novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição (TOKTAS et al., 2006). Estes materiais têm como característica a boa resistência mecânica, ductilidade e tenacidade maiores que o cinzento, devido à forma de nódulos em que a grafita se apresenta, mantendo a continuidade da matriz, gerando, assim, uma menor concentração de tensões (OLIVEIRA, 2008).

Estes materiais têm tomado grande parte do mercado dos aços de baixa resistência (RENEVIER, 2003). Quando se necessita de ferro fundido nodular com melhor resistência mecânica que encontrados normalmente, geralmente se utiliza duas estratégias: aumentar a proporção de cementita, com aumento também de dureza (este procedimento aumenta a fragilidade do material ficando susceptível a trincas) e/ou aumentar o número de outros carbonetos (este procedimento pode comprometer o equilíbrio da liga grafita/carbonetos) (TELES, 2007).

2.3. PRODUÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

A crescente utilização do ferro fundido nodular em aplicações de responsabilidade tem mostrado a necessidade de um controle mais efetivo sobre as etapas de fabricação. A qualidade do produto da fundição contínua está associada a algumas variáveis importantes de processo (Figura 1).

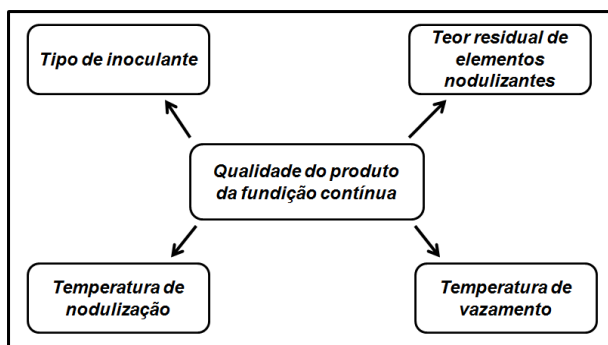


Figura 1 – Variáveis relacionadas com a qualidade do produto da fundição contínua. Adaptado de ANGELO JUNIOR (2003)

Na produção de ferro fundido nodular a composição química base deve ser ajustada à velocidade de resfriamento (espessura da peça). A matéria prima do ferro fundido nodular exige maior controle do que a do ferro fundido cinzento, visto que, pequenos teores de impurezas dificultam e, até, impedem a formação de nódulos (SOUZA SANTOS et al., 1983).

2.4. PROCESSO DE FUNDIÇÃO CONTÍNUA

A produção de componentes de ferro fundido nodular por fundição contínua é utilizada desde a década de 50. Anteriormente a essa data, costumava-se produzir perfis e barras redondas em moldes de areia. Por consequência de tensões térmicas elevadas e altas taxas de extração de calor, a adoção de moldes metálicos para a fundição de barras ficou restrito a ligas não ferrosas de baixo ponto de fusão (WHITE et al., 2002). Esse processo permite otimizar custos de produção visto que há redução do tempo de processo e, por consequência, um aumento do volume de barras fundidas produzidas (RIERA et al., 2002).

A fundição contínua representa uma importante alternativa na fabricação de peças de ferro fundido. O produto resultante da fundição é mais longo do que o molde, possibilitando a fabricação de barras nas mais variadas geometrias que, posteriormente, será usinado (FUCO, 1998).

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, o processo de fundição contínua. Cada perfil produzido por fundição contínua possui sua faixa de composição química obtida na fusão da carga que entra no forno cubilô. A composição

química e a temperatura do banho são ajustadas em forno de indução (ANGELO JUNIOR, 2003). A nodulização, para garantir a mudança da grafita de lamelas para nódulos, é feita em panela fechada e a inoculação, para garantir um número suficiente de centros para a nucleação da grafita, é feita na transferência para o forno de alimentação. Na faixa de composição química desejada, com temperatura de banho ideal, o ferro líquido é despejado no forno de alimentação através de uma bica de enchimento, iniciando o processo de fundição contínua (FUCO, 1998).

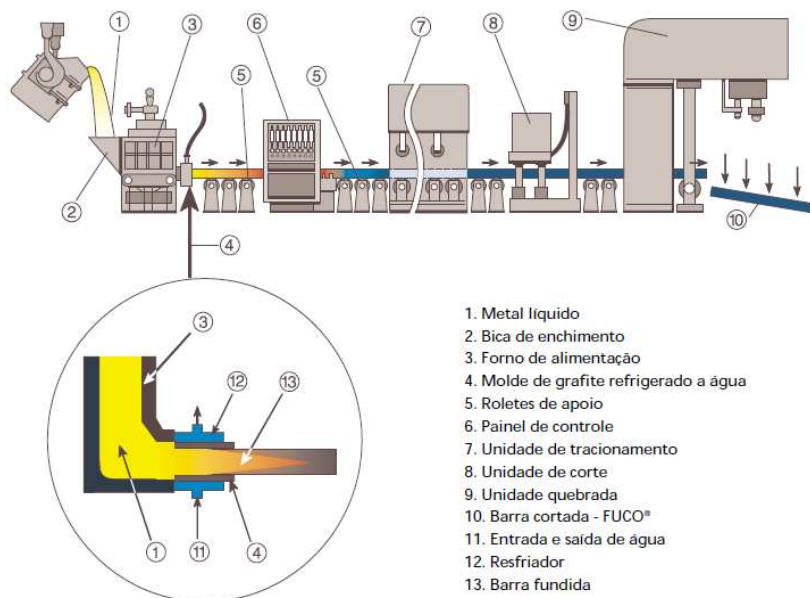


Figura 2 – Processo de fundição contínua (FUCO, 1998)

Durante o processo de fundição contínua, o tempo de espera é maior que o tempo de tracionamento, o que caracteriza um processo semicontínuo. O tempo de espera do metal líquido dentro da coquilha e o tempo de puxamento do perfil são calculados para evitar diversos problemas de fundição (MARWANGA et al., 1999). A demora no tracionamento resulta em um resfriamento excessivo e, conseqüentemente, o aparecimento de carbonetos, o que prejudica bastante as propriedades mecânicas do material fundido. Com o tracionamento rápido, a casca formada não possui geometria suficiente para garantir a estabilidade dimensional do perfil (ANGELO JUNIOR, 2003).

Uma das vantagens do processo de fundição contínua em relação ao processo de fundição convencional é a redução de porosidade. O aprisionamento mecânico dos gases, como os contidos nas cavidades do molde, gerados pelos moldes, devido à turbulência durante o vazamento e sistemas de canais inadequados, são as causas de porosidade na fundição convencional. O molde de grafite utilizado na fundição contínua não libera gases, sendo que a presença de gases limita-se a que está presente no metal líquido, reduzindo a tendência de formação de porosidade (FUCO, 1998). A Figura 3 apresenta outras vantagens do processo de fundição contínua em relação à fundição convencional.

Como se pode observar, a redução do nível de rechupe durante a fundição contínua é uma das vantagens deste processo em relação à fundição convencional. O rechupe é uma cavidade ocasionada pela contração do metal líquido durante a solidificação, sendo que o controle é tão mais difícil quanto mais complexo a geometria da peça fundida. Estes vazios se situam nos centros térmicos das peças, ou seja, nas regiões de maior espessura. No processo de fundição contínua o forno de alimentação faz o papel de um grande massalote, garantindo a alimentação contínua na matriz de grafite.

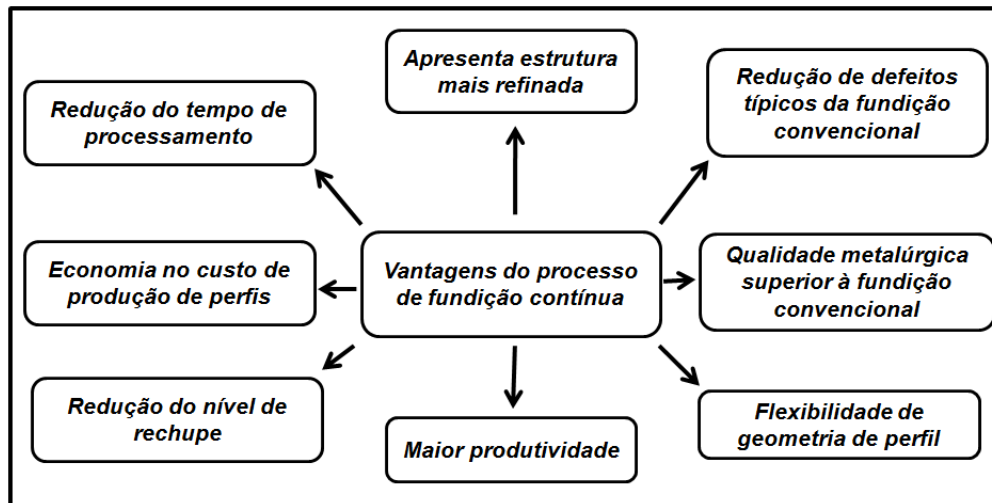


Figura 3 – Vantagens do processo de fundição contínua em relação à fundição convencional. Adaptado de (FUCO, 1998)

2.5. USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

A produção de ferros fundidos tem crescido muito nos últimos anos e representa boa parte do mercado dos materiais utilizados na indústria (SILVA et al., 2005). Segundo Trent e Wright (2000), uma grande razão para a utilização desses materiais na engenharia em larga escala não é apenas o baixo custo do material e do processo de fundição, mas também a economia da usinagem de peças acabadas.

A maioria dos ferros fundidos são ferríticos ou perlíticos e a usinabilidade vai depender da resistência e da ductilidade (ou fragilidade). Por exemplo, os ferros fundidos nodulares de baixa resistência (ferrita + grafita) são os que apresentam melhores características de usinabilidade, podendo-se usar a altas velocidades de corte. Para os ferros fundidos perlíticos, as velocidades de corte são menores e decrescem com aumento de dureza e resistência (TRENT e WRIGHT, 2000).

A usinabilidade pode ser considerada uma propriedade do material, porém, a medida da usinabilidade depende dos parâmetros considerados. Trent e Wright (2000) sugerem que a usinabilidade não é uma propriedade, mas o “modo” do material se comportar durante a usinagem. Machado et al. (2009) define usinabilidade como: “grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usar um material”.

Em geral, os ferros fundidos nodulares apresentam boa usinabilidade por quase todos os critérios, especialmente quando comparados aos aços (SOUZA et al., 2009; MACHADO et al., 2009). A usinabilidade desses materiais depende da composição química e da microestrutura (CASTILLO, 2005). As principais relações são: redução do teor de carbono, aumento no teor de silício (causa a diminuição da APC, melhorando, assim, a usinabilidade do material) e o aumento do teor de perlita (aumento da dureza e redução da usinabilidade do material) (SILVA, 2001).

Devido à ausência de porosidades e de camadas descarbonetadas, os materiais produzidos pelo processo de fundição contínua apresentam uma usinabilidade superior em comparação com a fundição em areia. Segundo Marwanga (1999), se compararmos com o aço, a melhora na usinabilidade deve-se, principalmente, a presença da grafita na estrutura, que atua como quebra cavacos e aumenta a lubrificação na interface cavaco/ferramenta, o que, conseqüentemente, reduz a temperaturas de usinagem e forças de cortes, aumentando, assim, a vida útil da ferramenta.

O processo de fundição contínua também é responsável pela redução de custos na fabricação de pequenos volumes de produção (MOORE, 1973). Esse processo apresenta um baixo custo de fabricação do molde, por se dispor de tamanhos e formas variadas. Será sempre possível selecionar um molde que mais se aproxima da forma final do componente a ser usinado. O material refugado representa um custo dispendioso para a empresa, visto que há perdas significativas de matéria prima, mão de obra e a disponibilidade de horas máquina para o processo produtivo (FUCO, 1998).

3. METODOLOGIA

3.1. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E REALIZAÇÃO DE PRÉ-TESTES

Serão realizados ensaios de furação com força de avanço constante para verificar, e quantificar, o nível de usinabilidade na seção transversal das amostras. Após a análise dos resultados obtidos, os testes de torneamento serão iniciados. Por fim, serão realizados alguns experimentos de fresamento no material de teste. Os testes de torneamento serão realizados em amostras cilíndricas, enquanto que os de fresamento em barras prismáticas. Para todos os testes citados acima, a realização de pré-testes será de fundamental importância para adequação das variáveis do processo, principalmente as condições de corte.

Para os ensaios de furação com força constante, será empregados três valores diferentes de força de avanço e de velocidade de corte ao longo de vários diâmetros do material. A variável de saída será o tempo de usinagem.

Nos experimentos a serem realizados no torno, será feito um planejamento fatorial 2k e, posteriormente, teste de hipótese. Nesse caso as variáveis de entrada serão: velocidade de corte, avanço, diâmetro do material e profundidade de corte. As variáveis de saída serão forças de corte, torque, potência, desgaste da ferramenta, vida da ferramenta e rugosidade da superfície usinada.

Para os testes de fresamento, assim como ocorreu no torneamento, será realizado um planejamento fatorial 2k e, posteriormente, teste de hipóteses. As variáveis de entrada serão: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. As variáveis de saída serão forças de corte, torque, potência, desgaste da ferramenta, vida da ferramenta e rugosidade da superfície usinada.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A caracterização das ligas será feita em termos de microestrutura, dureza, ductilidade e resistência. Para a análise de microestrutura as seções transversais das amostras serão lixadas utilizando-se com lixas d'água nas granulometrias #380, #200, #320, #400, #600 e #1200 mesh, polidas com pastas adiamantadas de 3 µm e atacadas com o reagente de Nital.

Uma vez caracterizada a microestrutura das seções transversais das amostras, as mesmas serão submetidas ao teste de dureza (Brinnell), utilizando-se uma esfera de Ø 2,5 mm e carga de 31,52 kg. Também serão realizados ensaios de tração para medição do alongamento, limite de escoamento e resistência em corpos de prova retirados ao longo da seção transversal (diferentes regiões) das barras do material. É importante ressaltar que cada teste será executado no mínimo de 5 vezes com o objetivo de verificar o comportamento médio, desvio-padrão e incertezas das medidas.

3.3. TESTES DE USINAGEM

Os testes serão realizados em barras redondas e retangulares. Todas as barras foram fornecidas pela Tupy S.A. As bitolas redondas possuem diâmetros de 50 mm, 150 mm, 250 mm e 450 mm. As três primeiras foram fornecidas em barras longas e a última na forma de bolacha (40 mm de espessura). Nessas barras redondas será possível investigar a variação da usinabilidade ao longo da seção transversal de uma barra e, também, investigar a variação da usinabilidade entre barras de bitolas diferentes. No formato retangular, foram fornecidas apenas bolachas de 600 mm x 400 mm x 40 mm. Nessas bolachas será investigada apenas a variação da usinabilidade ao longo da seção transversal, pois não foram fornecidas barras com bitolas diferentes. As barras redondas serão testadas no torneamento e a retangular no fresamento. Todas serão testadas no processo de furação, método de força de avanço (pressão) constante e deverão ser caracterizadas nos testes de dureza, tração e metalográfico.

A Figura 4 apresenta o fluxograma das atividades experimentais a serem desenvolvidas na tese. Pode-se observar que os ensaios experimentais foram divididos em duas etapas: ensaios de caracterização do material e ensaios de usinabilidade. A caracterização dos materiais será realizada em todas as barras (bitolas redondas e retangulares). Ensaios de dureza, de tração e de metalografia serão utilizados como critérios de avaliações.

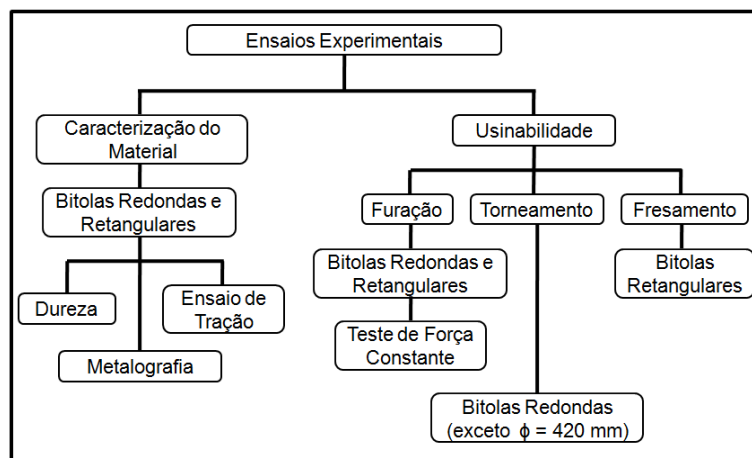


Figura 4. Fluxograma das atividades experimentais do trabalho de tese.

A investigação do comportamento da usinabilidade ao longo da seção transversal de peças de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua será feita por furação (teste de força constante), torneamento e fresamento. Nos ensaios de furação, os critérios avaliadores serão a velocidade de corte e carga, tendo como parâmetro de saída o tempo de furação. Brocas helicoidais de aço rápido revestida de TiN, de corte a direita e com duas arestas cortantes principais com diâmetro de 7,5 mm, fabricada pela OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda, serão utilizadas nos experimentos de furação com força constante.

Para os ensaios de torneamento os parâmetros de entrada serão a velocidade de corte, avanço de corte, profundidade de corte e bitola do material. Os dados de saída a serem analisados serão o desgaste da broca, vida, força de usinagem, torque e acabamento superficial. No final dos testes também será analisada o comportamento da zona de fluxo através de ensaios de quick-stop (Figura 5). As ferramentas utilizadas nos testes serão insertos de metal duro, classe K10, revestido com TiN. Essa ferramenta tem designação SNMG 120408-CM e fabricação da Sandvik Coromant. O suporte a ser usado será o PSSNR 2020 K12, também da Sandvik.

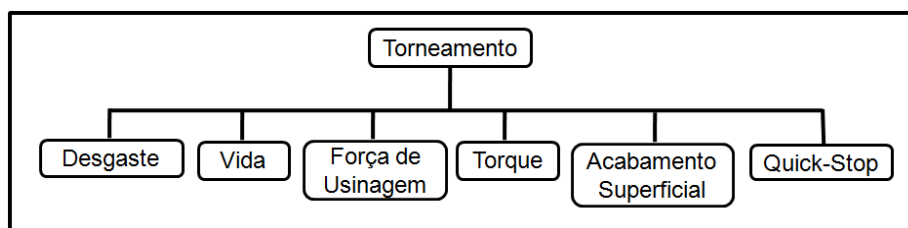


Figura 5 – Parâmetros de saída a serem investigados no processo de torneamento.

Os testes de fresamento serão realizados apenas nas barras retangulares, tendo como parâmetro de entrada a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A Figura 6 mostra os parâmetros de saída a serem investigados neste processo.

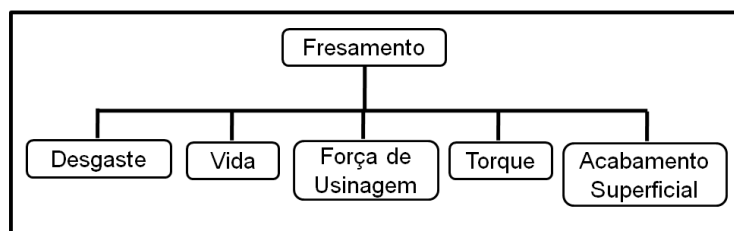


Figura 6 – Parâmetros de saída a serem investigados no processo de fresamento.

3.4. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Para melhor acompanhamento dos trabalhos desenvolvidos nas etapas descritas na metodologia de pesquisa, foi proposto um cronograma de atividades, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Atividades semestrais para execução do projeto de pesquisa

Etapas	2011/1	2011/2	2012/1	2012/2	2013/1	2013/2	2014/1	2014/2
Disciplinas								
Revisão Bibliográfica								
Planejamento dos Experimentos								
Caracterização do material								
Ensaio de Furação Constante								
Ensaio de torneamento								
Ensaio de Quick- Stop								
Exame de Qualificação								
Ensaio de Fresamento								
Ensaio de resistência à tração								
Análise e discussão								
Publicação de trabalhos								
Redação da tese/Publicação de Artigos								

4. AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, ao CNPq e a CAPES, pelo o apoio financeiro.

5. REFERÊNCIAS

- ANGELO JUNIOR, E. C. A., 2003, “Caracterização de ferro fundido nodular obtido por fundição contínua”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC, Curitiba, PR;
- BARBOSA, P. A.; COSTA, E. S.; MACHADO, A. R., 2007, “Usinabilidade do ferro fundido austemperado e nodular perlítico em furação”, 17º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia;
- CALLISTER, W. D., 2006, “Materials science and engineering - an introduction”, Editora McGrall-Hill., 7ª ed., 832 p;
- CASTILLO, W. J. G., 2005, “Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais”, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC;
- CHIAVERINI, V., 2005, “Aços e ferros fundidos”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª ed.;
- DAWSON, S., WURTEMBERG, M. V., 1994, “Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compacta como Material para Componentes Automotivos”, Baseado no trabalho apresentado no 26º ISATA, Aachen, Alemanha;
- DAWSON, W., SCHROEDER, T., 2004, “Practical applications for compacted graphite iron”, AFS Transactions, Des Plaines, USA: p.1-9;
- DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSE, R. A., 1997, “Materials and processes in manufacturing”, New Jersey, Prentice-Hall Inc.;
- DORÉ, C., 2007, “Influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 132 p;
- FATAHALLA, N., HUSSEIN, O., 1996, “Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile iron”, Journal of Materials Science, vol. 31, p 5765 – 5772;
- FUCO, 1998, “Perfis de fundição contínua”, Joinville: Indústria de fundição Tupy, Manual Técnico;
- GHANI, A. K., CHOUDHURY, I. A., HUSNI, G., 2002, “Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool”, Journal of Materials Processing Technology, v 127, p 17–22;
- GOODRICH, W. L., 2003, “Iron castings engineering handbook”, AFS;
- GRZESIK, W., RECH, J., ZAK, K., CLAUDIN, C., 2009, “Machining performance of pearlitic – ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 49, p 125 – 133;

- GUESSER, W. L., GUEDES, L. C., 1997, “Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística”, IX Simpósio de Engenharia Automotiva - AEA, São Paulo – SP;
- GUESSER, W. L., 2009, “Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos”, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1ª ed., p 309;
- JAVOID, A., DAVIS, K. G., SAHOO, M., 2000, “Effect of chemistry and processing variables on mechanical properties of thin wall ductile iron castings”, Transactions of the American Foundrymen’s Society, vol. 108, p 191 – 200;
- KLOCKE, F., KLÖPPE, C., LUNG, D., ESSIG, C., 2007, “Fundamental wear mechanisms when machining austempered ductile iron (ADI)”, CIRP vol. 56, p 73-76;
- MARWANGA, R. O., VOIGT, R. C., COHEN, P. H., 1999, “Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Gray Irons”. AFS Transactions, v 80, p 595-607;
- MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B., 2009, “Teoria da usinagem dos metais”, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP;
- MOORE, A., 1973, “Some factors influencing inoculation and inoculant fade in flake and nodular graphite irons”, Transactions of the American Foundrymen’s Society, v 81, p 268 – 277;
- MOREIRA, M. R. V., SOUZA, J. V. C., CUNHA, E. A., MARTINS, G. V., RAYMUNDO, E. A., KELLY, C. A., 2004, “Torneamento do ferro fundido vermicular utilizando pastilhas cerâmicas à base de negro de silício (Si3N4)”, Anais, Congresso de Usinagem, Brazil;
- OLIVEIRA, V. V., 2008, “Influência da geometria NE furação do ferro fundido vermicular”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR, 173 p.;
- PETRY, C. C. M., 1999, “Avaliação das propriedades de impacto e dos mecanismos de fratura de ferros fundidos nodulares ferríticos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS;
- RENEVIER, N. M., 2003, “Performance and Limitation of Hybrid PECVD (Hard Coatings) – PVD Magnetron Sputtering (MoS2 / Ti Composite) Coated Inserts tested for Dry High Speed Milling of Steel and Grey Cast Iron”, Surface and Coatings Technology: Elsevier, v. 163 - 164, p 659 - 667;
- REUTER, U., SCHULZ, H., DAWSON, S., HOLLINGER, I., ROBBINS, M., DAETH, J., 2001, “The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron”. Society of Automotive Engineers, Inc, Alemanha, , p 1-18.;
- RIERA, G.; BOERI, R. & SIKORA, J., 2002, “Revealing and characterising solidification structure of ductile cast iron. Materials”, Science and Technology, Vol.18, n.6, p 691-697;
- SHARMAN, A., DEWES, R. C., ASPINWALL, D. K., 2001, “Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718TM”, Process. Technologies, v 118, p 29–35;
- SILVA, R. B., 2001, “Alargamento cônico do Ferro Fundido Nodular GGG 40”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 107 p;
- SILVA, R. B., PEREIRA, I. C., ALMEIDA, D. O., DA SILVA, M. B., 2005, “Investigação da usinabilidade do ferro fundido nodular”, 15º PÓSMEC, Universidade Federal de Uberlândia;
- SOUZA SANTOS, A. B., BECKERT, E. A., FENILLI, R., PIESKE, A., 1983, “Processos de nodulização de ferros fundidos”, Metalurgia ABM, v.39 (311): p. 521 -527;
- SOUZA, J. V. C., NONO, M. C. A., RIBEIRO, M. V., MACHADO, J. P. B., SILVA, O. M. M., 2009, “Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool”, Materials and Design, vol. 30, p 2715 – 2720;
- TELES, J. M., 2007, “Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 124 p;
- TOKTAS, G.; TAYAN, M., TOKTAS, A., 2006, “Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron”, Materials Characterization, vol. 57, p 290-299;
- TRENT, E. M., WRIGTH, P. K., 2000, “Metal cutting”, vol. 4, Butterworths, England., 446 p.
- WHITE, C. V., FLINN, R. A., TROJAN, P. K., 2002, “An investigation of three different methods of nodularity evaluation in ductile cast iron”, Transactions of American Foundrymen’s Society, v 89, p 639 – 644.