

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE GUILHERME SILVA

ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE DOIS INOCULANTES
ALTERNATIVOS E SUAS INFLUÊNCIAS NA RUGOSIDADE E TRAÇÃO DO
FERRO FUNDIDO CINZENTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015

HENRIQUE GUILHERME SILVA

ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE DOIS INOCULANTES
ALTERNATIVOS E SUAS INFLUÊNCIAS NA RUGOSIDADE E TRAÇÃO DO
FERRO FUNDIDO CINZENTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Mecânica (COEME), da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori
Moreno.

Coorientador: Prof. Dr Celso Naves.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Henrique Guilherme da Silva

ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE DOIS INOCULANTES ALTERNATIVOS E SUAS INFLUÊNCIAS NA RUGOSIDADE E TRAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 02/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Joao Roberto Sartori Moreno - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Celso Naves de Souza - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Ferneda - (Membro)

Prof(a). Esp. Henrique Flávio Alves de Andrade - (Membro)

Aos meus pais principalmente e irmãos. Aos amigos, professores e colaboradores que me proporcionaram esta oportunidade de chegar ao fim deste curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho e traçar minhas decisões.

Deixo aqui registrado meu reconhecimento à minha família, meu pai José Roberto da Silva que é o maior exemplo da minha vida, por ter me dado todo o suporte necessário e minha mãe Joana Caide pelo amor e cuidados, sem eles o caminho percorrido não seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno por ter me dado a oportunidade de realizar um trabalho que traz benefícios para a indústria e também por poder trabalhar com alguém do nível de conhecimento que ele possui.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Celso Naves, que sempre esteve disposto a ajudar com paciência a qualquer momento, dando todo o suporte necessário para realização deste trabalho. Aos meus amigos que me deram força ou que de alguma forma se preocuparam.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Cornélio Procopio - por ter cedido os materiais e o laboratório.

A MGL Fundação por também ter cedido os materiais e laboratórios.

A minha banca que auxiliou na correção deste trabalho e deram opiniões construtivas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

"Não sabendo que era impossível, foi lá e fez"
(Jean Cocteau)

"No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade"
(Albert Einstein)

RESUMO

SILVA, Henrique Guilherme. Estudo comparativo na utilização de dois inoculantes alternativos e suas influências na rugosidade e tração do ferro fundido cinzento. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

A utilização de inoculantes é hoje uma das operações mais importantes na indústria de produção do ferro fundido. Basicamente a inoculação é a adição de ligas à base de silício, objetivando a formação de grafita durante a solidificação, neste trabalho utilizaremos três tipos de inoculantes. O desenvolvimento desta pesquisa se dará através da análise do material a partir da fabricação dos corpos de prova, avaliando os resultados através dos ensaios de rugosidade e tração.

Palavras-chave: Ferro fundido; Inoculantes; Ensaios de rugosidade e tração.

ABSTRACT

SILVA, Henrique Guilherme. Estudo comparativo na utilização de dois inoculantes alternativos e suas influências na rugosidade e tração do ferro fundido cinzento. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

The use of inoculants is now one of the most important operations in the production of cast iron industry. Inoculation is the addition of silicon -based alloys, aiming at the formation of graphite during solidification; this paper will use three types of inoculants. The development of this research will be through the analysis of the material from the manufacture of the specimens, evaluating the results through the roughness and drift trials.

Palavras chave: Cast iron; inoculants; Testing of roughness and traction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Efeito do P(%) na formação de steadita no ferro fundido cinzento	15
Figura 02: Efeito do enxofre no número de células eutéticas e profundidade do conquilhamento	16
Figura 03: Matriz Ferrita-Perlita em Ferro Fundido Nodular	18
Figura 04: Microestrutura típica do FC: (a) estrutura da grafita e (b) matriz perlítica	19
Figura 05: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono	20
Figura 06: Curva de resfriamento de ferro fundido cinzento	22
Figura 07: Gráfico curva de resfriamento dos ferros fundidos cinzento	24
Figura 08: Grafita tipo A em ferro fundido cinzento inoculado (a) e grafita tipo D em amostra não inoculada (b)	25
Figura 09: Efeito de inoculação no limite de resistência.	26
Figura 10: Detalhamento do corpo de prova de ferro fundido cinzento GG-25	30
Figura 11: Forno de indução	31
Figura 12: Corpos de prova moldados em areia verde	32
Figura 13: Caixas com os corpos de prova, moldados, vazada	33
Figura 14: Ilustração Máquina de Tração	37
Figura 15: Gráfico Tensão X Deformação	38
Figura 16: Rugosímetro	40
Figura 17: Rugosidade (Ra); Ferramenta nova	41
Figura 18: Rugosidade (Rz); Ferramenta nova	42
Figura 19: Rugosidade (Rt); Ferramenta nova	42
Figura 20: Rugosidade (Ra); Ferramenta em fim de vida	43
Figura 21: Rugosidade (Rz); Ferramenta em fim de vida	43

Figura 22: Rugosidade (Rt); Ferramenta em fim de vida	44
Figura 23: Máquina de Ensaio de Tração	45
Figura 24: Ensaio de tração no FFC Inoculado com o G-20	46
Figura 25: Ensaio de tração no FFC Inoculado com o IM-22	47
Figura 26: Ensaio de Tração no FFC inoculado com IMSR - 75	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONCEITO DE FUNDIÇÃO	12
1.2 OBJETIVO GERAL	13
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 FERRO FUNDIDO	14
2.1.1 FERRO FUNDIDO CINZENTO	18
2.2. SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	20
2.2.1 SEQUENCIA DE SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	21
2.2.2 MORFOLOGIA DA GRAFITA EM FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	23
2.3 INOCULAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	24
2.4 TIPOS DE INOCULANTES	26
2.5 USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	28
3. MATERIAIS E TÉCNICAS	29
3.1 O FERRO FUNDIDO CINZENTO DO ESTUDO	29
3.1.1 FUSÃO	30
3.1.2 INOCULAÇÃO	31
3.1.3 VAZAMENTO	32
4. ENSAIOS MECÂNICOS	34
4.1 RUGOSIDADE	35
4.1.1 RUGOSÍMETRO	36
4.1.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	36

5. RESULTADOS	40
5.1 RUGOSIDADE	40
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	44
6. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONCEITO DE FUNDIÇÃO

A fabricação dos materiais metálicos se processa via quatro conhecidos processos: fundição, conformação mecânica, usinagem e metalurgia do pó. Cada um desses processos de fabricação possui características próprias, e dependendo da peça produzida, o projetista deve optar pelo processo mais conveniente tanto tecnicamente quanto em menor custo.

Entre principais materiais utilizados na indústria da fundição estão os ferros fundidos, o alumínio e o aço. O ferro fundido continua sendo o mais importante material de fundição com mais de 70% da tonelagem mundial total produzida. Conforme a forma de apresentação da grafita, o ferro fundido pode ser dividido em lamelar (ferro fundido cinzento) e esferoidal (ferro fundido nodular). (JABBARI; HOSSEINZADEH: 2013)

Em especial, o ferro fundido cinzento é tradicionalmente escolhido em muitas aplicações industriais devido a sua flexibilidade de uso: boa fusão, baixo custo (20% a 40% menos que o aço) e uma ampla faixa de propriedades mecânicas e carbono regulando em torno de 2,50 a 4,00% e silício entre 1,00 e 3,00% em sua maioria. (CHIAVERINI, V: 1988)

As propriedades mecânicas e estruturais do ferro fundido cinzento podem ser melhoradas por meio da adição de ligas à base de Ferro-Silício momentos antes do vazamento do ferro líquido. Tal técnica, denominada como inoculação, tem como papel principal reduzir o super-resfriamento na solidificação, aumentando o número de células eutéticas para evitar grafita de super-resfriamento e carbonetos na matriz metálica, e evitar a solidificação pelo sistema eutético metaestável, objetivando a obtenção de grafita do tipo A, tornando-se também uma abordagem viável para melhorar a usinabilidade do material.

1.2. OBJETIVO GERAL

Mostrar por meio deste trabalho os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação na área de processos de fabricação e tecnologia dos materiais. O mesmo consiste na realização dos ensaios e estudos sobre efeitos de inoculantes nas propriedades fundamentais dos ferros fundidos cinzentos.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Pesquisar os efeitos de inoculantes a base de FeSi-Sr e FeSi-Ba nas propriedades do ferro fundido cinzento GG-25: Acabamento após a usinagem da superfície usinada (rugosidade).
- b. Verificar os efeitos de inoculantes a base de FeSi-Sr e FeSi-Ba sobre as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento GG-25, isto é: Carga máxima suportada e limite de resistência a tração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Denota-se neste capítulo, por meio de análise, uma série de metodologia e técnicas utilizadas para a obtenção dos parâmetros de usinabilidade do ferro fundido cinzento.

De início, apresenta-se uma breve revisão sobre os materiais utilizados na pesquisa, incluindo as principais propriedades mecânicas e de solidificação do ferro fundido cinzento.

São também apresentados os principais inoculantes utilizados na indústria de fundição, com um breve histórico da sua utilização, tipos e influência nas propriedades mecânicas e na usinagem do material.

Por último destaca-se uma abordagem das principais propriedades de usinabilidade do ferro fundido cinzento e dos ensaios realizados em trabalhos anteriores com os resultados obtidos na área até o presente momento.

2.1 FERRO FUNDIDO

O ferro fundido é uma liga de ferro em mistura eutética com elementos à base de carbono e silício. Forma uma liga metálica de ferro, carbono (a partir de 2,11%), silício (entre 1 e 3%), podendo conter outros elementos químicos. Sua diferença para o aço é que este também é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, mas com percentagens entre 0,002 e 2,11%. Os ferros fundidos dividem-se em três tipos principais: branco, cinzento e nodular.

De acordo com Chiaverini (1988), a composição química é um dos fatores mais importantes para determinar a microestrutura dos ferros fundidos. Nesse caso, os elementos de liga têm o seguinte efeito:

- **Carbono (C):** É o elemento mais importante em ferros fundidos. É o maior responsável pelas propriedades mecânicas e de fundição. Elemento base que determina a quantidade de grafita a se formar;
- **Silício (Si):** é um elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. Sua presença, independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou branco;
- **Fósforo (P):** raramente é adicionado intencionalmente, mas tende a vir junto com o ferro gusa ou a sucata utilizada. Até certo ponto aumenta a fluidez do ferro. Forma uma fase de fosfeto com baixo ponto de fusão no ferro fundido cinzento, comumente denominada como steadita. Conforme a pesquisa de Abbasi (2007), aumentando o percentual de fósforo de 0,45% para 2,58% de peso, a quantidade de steadita aumenta de 4,7% para 17,81% no ferro fundido cinzento, como pode ser observado na Figura 01.

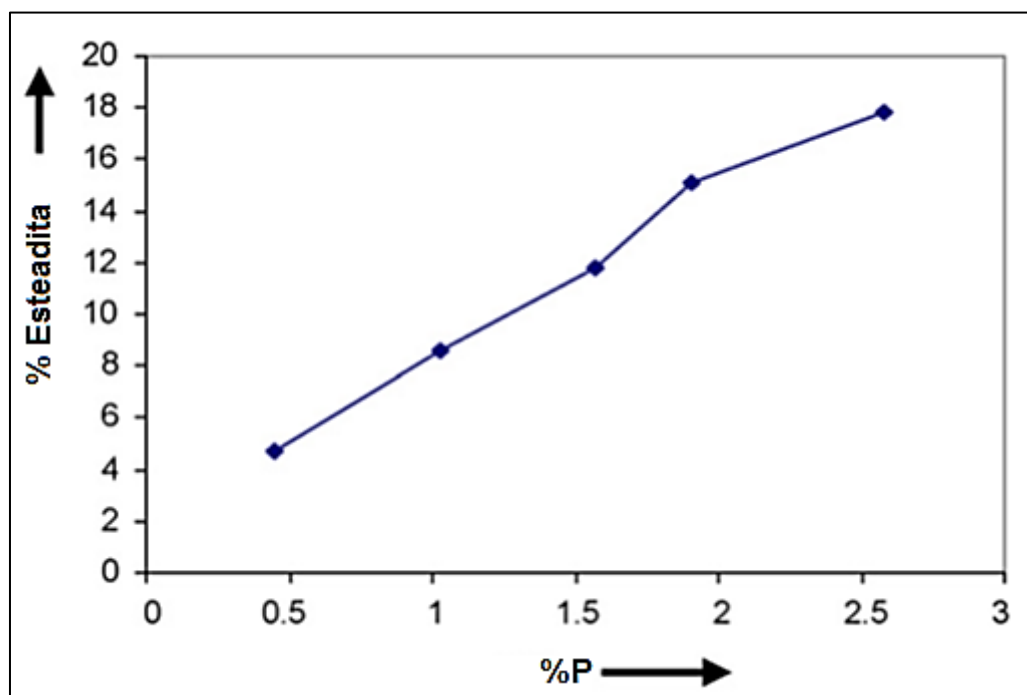


Figura 01 – Efeito do fósforo P(%) na formação de steadita no ferro fundido cinzento
Fonte: Abbasi (2007, p.316)

Em níveis elevados, o fósforo pode promover a redução da porosidade, enquanto que níveis muito baixos podem aumentar a penetração do metal no molde. Como resultado, a maioria das peças é produzida com níveis de fósforo em torno de 0,02 a 0,10%. Em fundidos críticos que devem desenvolver resistência à tração, pode ser necessário o desenvolvimento de níveis ótimos para aplicação. (ASM HANDBOOK, 1992)

- **Enxofre (S):** tem um papel significativo na nucleação da grafita, além do crescimento de células eutéticas e profundidade do coquilhamento no ferro fundido. A Figura 02 mostra esta relação para ferros fundidos cinzentos com inoculação e sem inoculação, no entanto, conforme pode ser observado, o nível de enxofre no ferro fundido cinzento deve estar no intervalo aproximado entre 0,05 e 0,12% para o máximo aproveitamento. (ASM HANDBOOK, 1992)

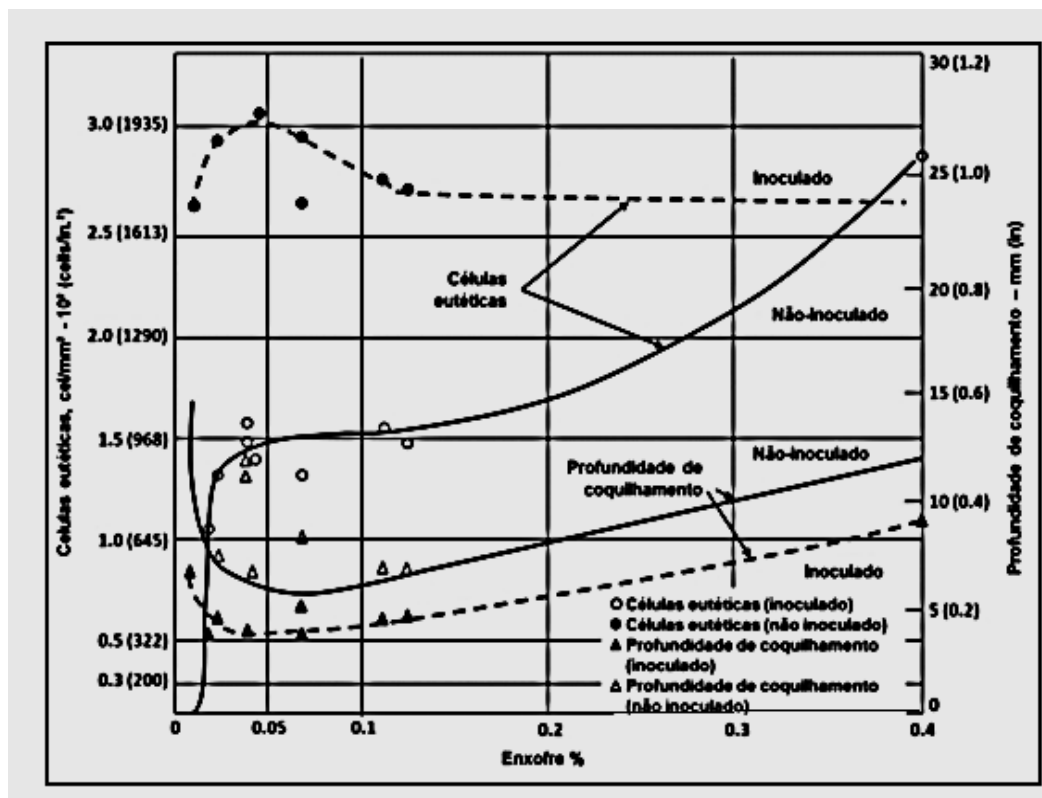


Figura 02 – Efeito do enxofre no número de células eutéticas e profundidade de coquilhamento

Fonte: ASM Handbook (1992, p.1368)

- **Manganês (Mn):** apresenta efeitos contrários em relação ao enxofre sobre a nucleação da grafita e, conseqüentemente, sobre o número de células eutéicas. Forma junto ao enxofre, sulfetos de manganês (MnS), que proporciona núcleos para a grafita e evita a presença de enxofre livre no líquido que reduz a velocidade de crescimento das células eutéicas. Desta forma é necessário que os teores de manganês e enxofre sejam balanceados estequiometricamente.

A matriz metálica dos ferros fundidos pode ser constituída de ferrita, este microconstituente resulta em baixos valores de resistência associados a altos valores de ductilidade e tenacidade. Outra possibilidade é que a matriz seja de perlita, o que implica em bons valores de resistência mecânica, associados a valores relativamente baixos de ductilidade. Produzindo-se então misturas de ferrita e perlita obtêm-se as diferentes classes de ferros fundidos, com diferentes combinações de propriedades, cada qual adequada para uma aplicação específica. (GUESSER, 2009)

O trabalho de Radzikowska (2005) mostra a matriz de um ferro fundido nodular composta dos microconstituintes perlita presente na região escura da microestrutura e a ferrita, localizada na região mais clara em torno dos nódulos da grafita, de acordo com a Figura 03.

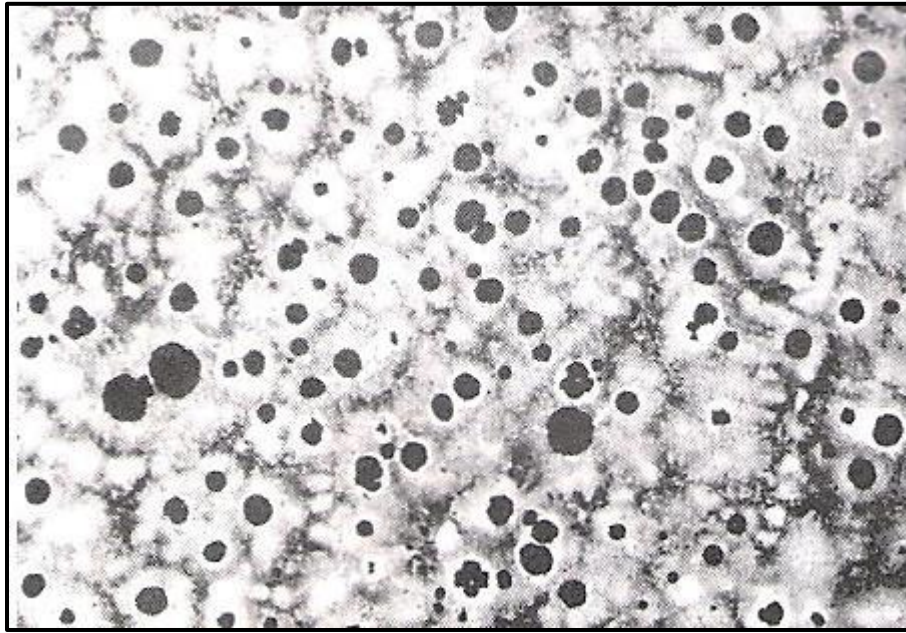


Figura 03 – Matriz Ferrita-Perlita em Ferro Fundido Nodular
Fonte: Gentileza do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

2.1.1 FERRO FUNDIDO CINZENTO

Entre os ferros fundidos, o cinzento é o mais comum, devido às suas características como baixo custo (em geral é fabricado a partir de sucata); elevada usinabilidade, devida à presença de grafita livre em sua microestrutura; Alta fluidez na fundição, permitindo a fundição de peças com paredes finas e complexas; e facilidade de fabricação, já que não exige equipamentos complexos para controle de fusão e solidificação.

Este tipo de material é utilizado em larga escala pela indústria de máquinas e equipamentos, indústria automobilística, ferroviária, naval e outras. A presença de veios de tipos de matriz metálica (variações nos teores de perlita e cementita). Podem ser submetidos a tratamentos térmicos para endurecimento localizado, porém, em geral, são utilizados principalmente no estado bruto de fundição, podendo ainda ser normalizado ou recozido, por tratamento térmico.

A microestrutura do FC caracteriza-se por grafitas lamelares dispersas em uma matriz predominantemente perlítica. As práticas de fundição podem influenciar a nucleação e o crescimento da grafita, de tal modo que a quantidade, o tamanho, morfologia e a distribuição das lamelas na matriz são fatores críticos na determinação das propriedades mecânicas do FC. A Figura 04 apresenta a microestrutura típica do ferro fundido cinzento com matriz perlítica.

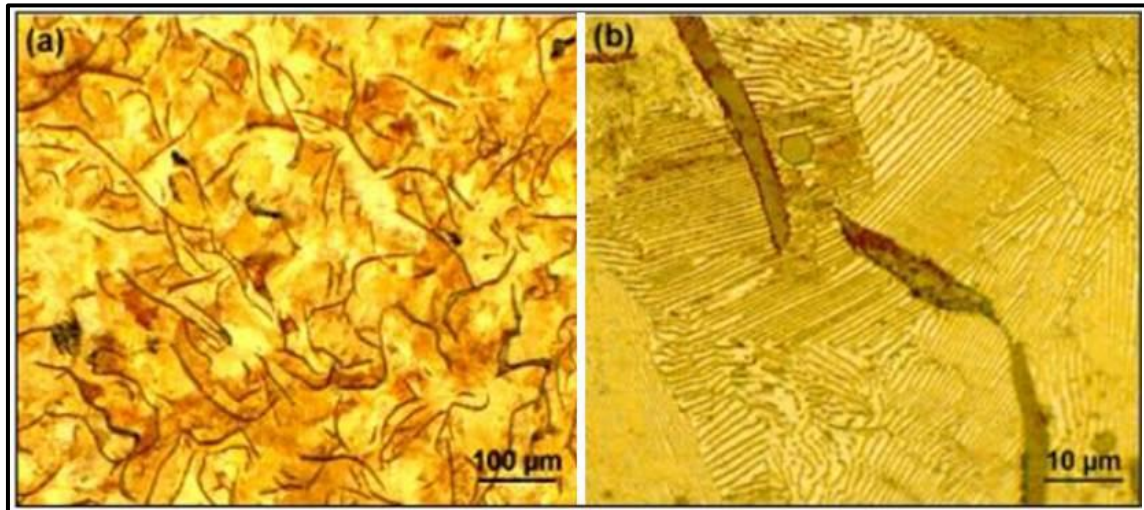


Figura 04 – Microestrutura típica do FC: (a) estrutura da grafita e (b) matriz perlítica
Fonte: Pereira (2012, p.64)

Os ferros fundidos cinzentos cobrem uma faixa de Limite de Resistência (LR) de 100 Mpa a 400 Mpa (mais comumente de 150 Mpa a 300 Mpa), sendo que o alongamento por ser muito pequeno não é especificado. A grafita em forma de veios fornece ainda bons valores de condutividade térmica, o que torna o ferro fundido cinzento um material muito empregado para componentes sujeitos à fadiga térmica. Outra propriedade de destaque dos ferros fundidos cinzentos é a capacidade de amortecimento de vibrações, importante para bases de máquinas e aplicações com restrições de ruídos. Tais características torna o FC um material muito utilizado para a fabricação de polias, carcaças, blocos e cabeçotes de motores, volantes, discos e tambores de freio.

mesmo um patamar na curva de resfriamento, isto representa o momento em que ocorre a nucleação e o crescimento de alguma fase sólida. Teoricamente a temperatura em que ocorre a formação de alguma fase é exatamente ao se ultrapassar alguma linha do diagrama de equilíbrio. Em condições reais essa inflexão sempre ocorre um pouco abaixo da temperatura teórica e diz-se que a transformação ocorre com super-resfriamento. (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1985)

A solidificação é um processo termicamente ativado, sendo indispensável ocorrer um super-resfriamento em relação à temperatura de equilíbrio, para que os primeiros núcleos comecem a se formar. (SOUZA SANTOS; CASTELLO BRANCO, 1989).

Para obtenção de ferros fundidos cinzentos, a solidificação deve ocorrer pelo sistema eutético estável, para ocorrer nucleação e crescimento da grafita. Para isso, é necessário que o super-resfriamento do líquido eutético situe-se a temperaturas superiores à do início de formação do eutético metaestável, evitando assim a formação de carbonetos.

Outra variável importante é a velocidade de resfriamento, uma vez que altas velocidades favorecem a formação de grafitas de super-resfriamento e de cementita (Fe_3C), fase de alta dureza que tem efeito sobre a usinabilidade.

A velocidade de resfriamento é fator preponderante na formação de carbonetos, em especial para peças de menores massas.

2.2.1 SEQUENCIA DE SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

No caso de ferros fundidos cinzentos a solidificação processa-se, na maioria das vezes, em duas etapas. A primeira consiste na separação da fase pró-eutética, isto é, nucleação e crescimento de dendritas de austenita nos ferros fundidos hipoeutéticos, ou de grafita primária nos ferros fundidos hipereutéticos. A última

etapa, que é a única para os ferros fundidos eutéticos, corresponde à solidificação eutética, ou seja, a formação simultânea de austenita e grafita. Nesta fase originam-se, portanto, as chamadas células eutéticas.

Constitui-se cada célula de um agregado de grafita e austenita onde a grafita está presente como um esqueleto contínuo e ramificado dentro da célula. De acordo com Rivera, Boeri e Sikora (2004), as duas fases das células eutéticas (grafita e austenita) crescem cooperativamente estando ambas em contato com o líquido.

Uma curva de resfriamento de ferro fundido cinzento detalhada é apresentada na Figura 06.

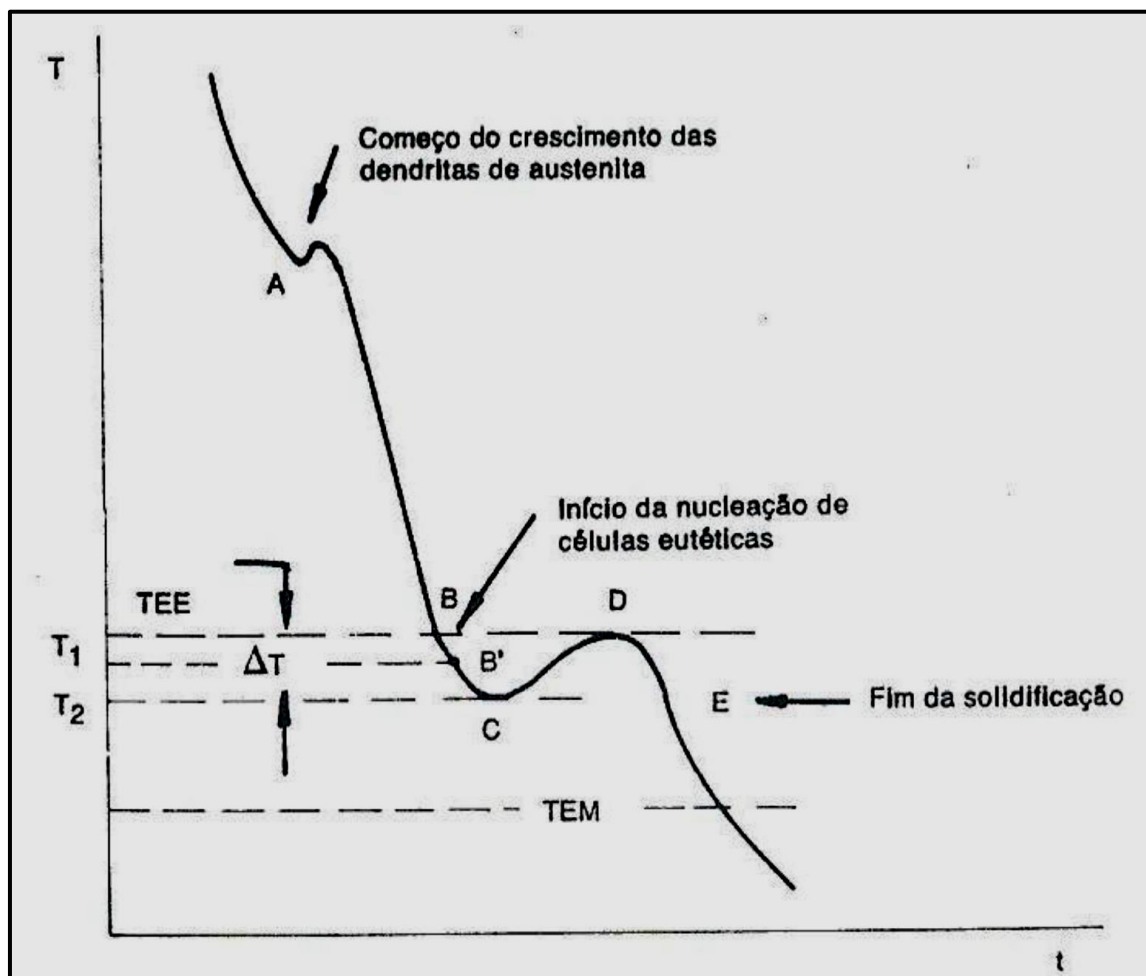


Figura 06 – Curva de resfriamento de ferro fundido cinzento
Fonte: Stuewe (2008, p.38)

O ponto A indica a solidificação da fase pró-eutética, na qual ocorre o começo do crescimento das dentritas de austenita. O ponto B corresponde à solidificação eutética, na qual ocorre o início da nucleação de células eutéticas.

A solidificação das células eutéticas, como se observa na curva de resfriamento de ferro fundido cinzento só se inicia em temperaturas inferiores a da solidificação de equilíbrio do eutético estável (TEE). O intervalo entre esta temperatura e a temperatura real de solidificação representa a quantidade de super-resfriamento (ΔT). À medida que a quantidade de super-resfriamento aumenta, a solidificação eutética aproxima-se da temperatura de solidificação de equilíbrio eutético metaestável (TEM), de forma que, com alto grau de super-resfriamento o líquido eutético tende a se solidificar parte como ferro fundido cinzento e parte como ferro fundido branco.

2.2.2 MORFOLOGIA DA GRAFITA EM FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

O ferro fundido cinzento caracteriza-se por apresentar em sua matriz grafitas de carbono em forma de veios, ou lamelas, podendo ainda apresentar-se com diferentes morfologias, tamanhos, e dependendo do grau de super-resfriamento em que ocorre a solidificação do eutético, que pode ser mais próxima da temperatura eutética estável (TEE) ou da temperatura eutética metaestável(TEM), conforme a Figura 7.

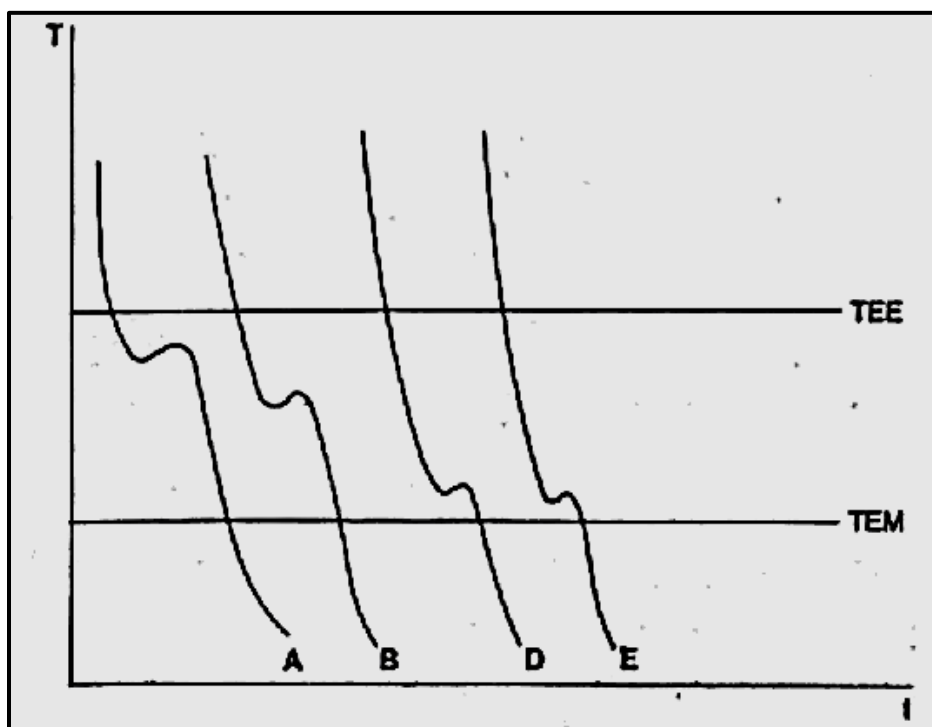


Figura 07 – Gráfico curva de resfriamento dos ferros fundidos cinzento
Fonte: Muller, 2002

2.3. INOCULAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

A inoculação tem se tornado uma das operações metalúrgicas mais importantes na produção de fundidos com qualidade. De forma geral, a inoculação refere-se a adição de diferentes ligas, a base de Silício, com o objetivo de formar grafita durante a solidificação, elevar o número de células eutéticas e reduzir o tamanho das dendritas de austenita.

A inoculação atua no sentido de produzir grafita tipo A e matriz perlítica, e um número de células eutéticas relativamente elevado. Tende evitar a formação de pontos duros (carbonetos) e mesmo pontos moles (área de ferrita). (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1985)

Nas curvas de análise térmica, se permite acompanhar o processo de solidificação, registrando a variação de temperatura com o tempo. Verifica-se que a

inoculação diminui o afastamento do equilíbrio (super-resfriamento), diminuindo o risco da temperatura do líquido situar-se abaixo da temperatura eutética metaestável (abaixo da qual poderia formar-se cementita). A inoculação afeta ainda as propriedades mecânicas dos ferros fundidos, evitando a formação de grafita de super-resfriamento, associada a matriz ferrítica, de baixa resistência.

A inoculação favorece a formação de grafitas tipo A e evita a formação de grafitas de super-resfriamento (tipo D) por meio do aumento da taxa de crescimento de células eutéticas. A Figura 08 apresenta a alteração na microestrutura do ferro fundido cinzento, provocada pela inoculação.

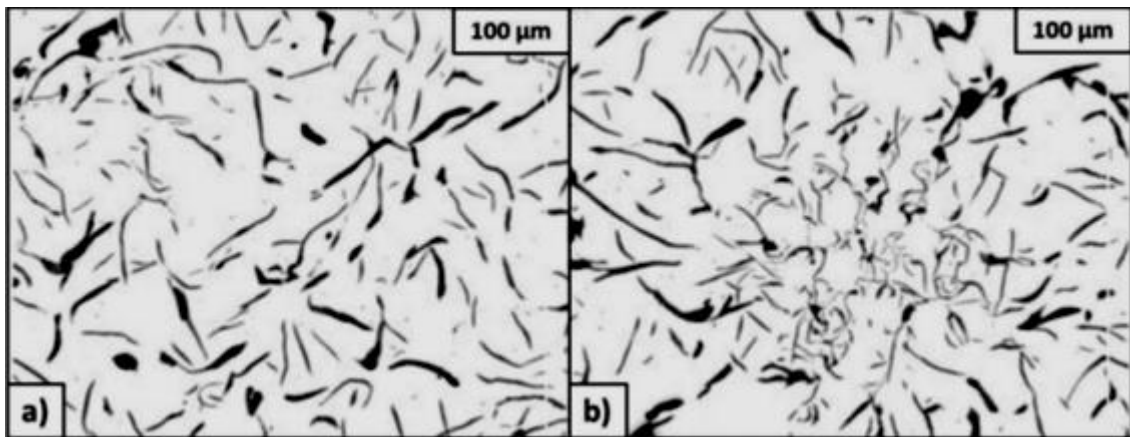


Figura 08 – Grafita tipo A em ferro fundido cinzento inoculado (a) e grafita tipo D em amostra não inoculada (b)
Fonte: Frás; Górný (2012, p. 43)

Tendo em vista que a inoculação atua diretamente na produção de grafitas do tipo A, evitando assim formação de grafitas de super-resfriamento e a presença de carbonetos na matriz do ferro fundido cinzento. Além disso, sabe-se que a adição de inoculantes é uma ferramenta muito eficaz para aumentar o número de células eutéticas. Pode-se concluir através de sua pesquisa que a inoculação age aumentando a quantidade de células eutéticas e que a técnica de inoculação favorece a obtenção de excelentes propriedades físicas e mecânicas, tais como

melhora na usinabilidade e aumento da resistência a tração como pode ser observado no gráfico da Figura 09.

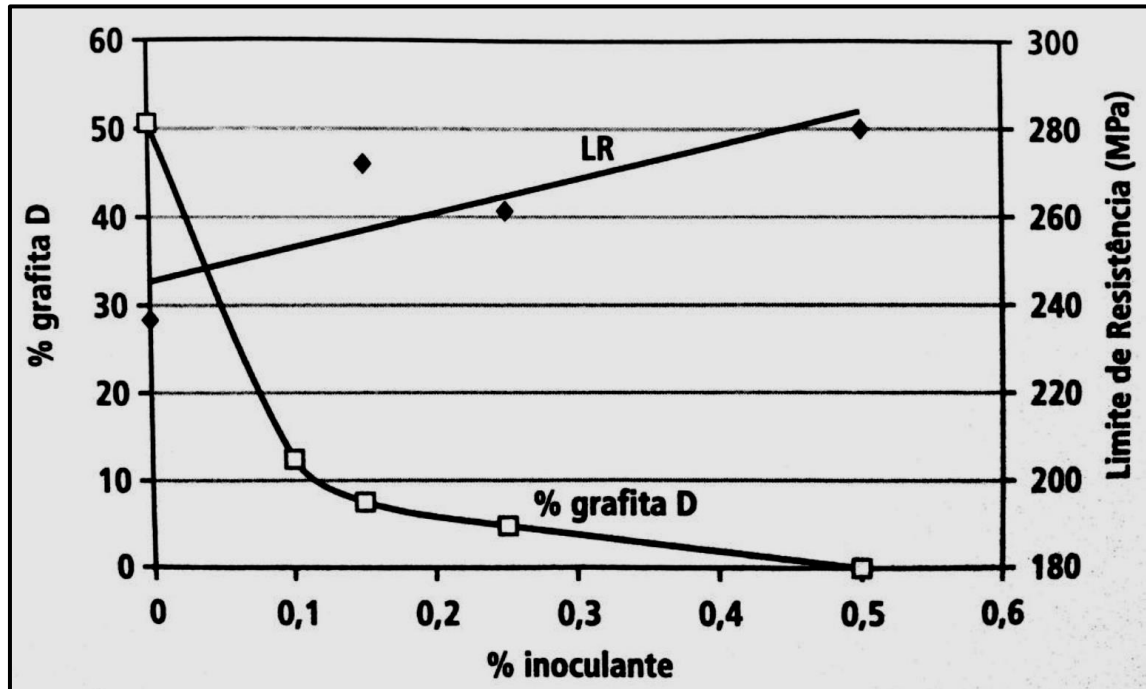


Figura 09 – Efeito de inoculação no limite de resistência
Fonte: Guesser (2009, p. 78)

Os inoculantes apresentam seu desempenho máximo imediatamente após a sua adição. As partículas nucleantes têm a sua ação dependente do tempo que transcorre desde o momento de sua adição até a solidificação no molde. Com o aumento deste intervalo, a eficiência do inoculante diminui, sendo esta perda de eficiência denominada pela literatura inglesa como *fading*.

2.4 TIPOS DE INOCULANTES

O inoculante mais usado é o Ferro-Silício com 75% a 80% de Silício, adicionando em teores entre 0,2% a 0,6%. Os residuais Cálcio e Alumínio que, em geral, existem no Ferro-Silício teriam um efeito marcante no poder de grafitização.

Além do Fe-Si comum existem diversos outros inoculantes, em geral, conhecidos por “nomes comerciais”. A maioria são a base de Fe-Si contendo além de Al e Ca, adições de Bário, Zircônio e estrôncio (Ba, Zr e Sr respectivamente). Existem outros à base de Ca-Si, à base de grafita ou carbonetos. Há também inoculantes que além do efeito grafitizante podem conter elementos de liga, como por exemplo, cromo, molibdênio, níquel, entre outros elementos que atuam como perlitizantes.

Entre os vários tipos de inoculantes existentes no mercado, alguns elementos tais como, Ba, Zr e Sr são os mais eficientes para a inoculação, tanto de ferro fundido cinzento como ferro fundido nodular.

- **Inoculantes à base de FeSi-Ba:** atuam com efetividade na redução do super-resfriamento e formação de grafita tipo A mesmo em condições de fusão adversas (problemas com temperatura, composição química ou carga do material, entre outros.). O efeito de *fading* é mais prolongado com a utilização de inoculantes à base de FeSi-Ba, quando comparado a outros inoculantes à base de FeSi comuns. (JEZIERSKI; BARTOCHA, 2007)

Este tipo de inoculante possui alto poder anticoquilhante quando combinado a elementos como zircônio, cálcio e silício, agindo em conjunto com o enxofre presente na composição do ferro fundido cinzento. A combinação bário e cálcio, comum neste tipo de inoculante, permite a ampliação da faixa de temperatura de atuação, possibilitando ótimos resultados em peças com paredes finas ou que contenham elementos fortemente coquilhantes.

- **Inoculantes à base de FeSi-Sr:** foram desenvolvidos pelo BCIRA na Inglaterra, conhecidos comercialmente por SuperSeed (marca registrada da Elkem). É considerado um inoculante potente sendo um dos mais efetivos para eliminar a presença de carbonetos em ferros fundidos cinzentos.

Altos teores de alumínio e cálcio reduzem significativamente a eficiência da inoculação para ligas de estrôncio, por isso, este tipo de inoculante deve conter no máximo 0,1% de cálcio e 0,5% de alumínio.

O FeSi-Sr é mais eficiente para reduzir coquilhamento em seções finas, superfícies e cantos, e desta forma evitar a ocorrência de fraturas devido à presença de carbonetos.

Uma grande diferença deste tipo de inoculante em relação a outros é que este atinge os efeitos desejados para menores quantidades adicionadas no banho, o que diminui a formação de escória, proveniente da oxidação de certos elementos da liga, diminuindo a ocorrência de defeitos superficiais na peça, e também, podendo ser dissolvido a temperaturas mais baixas. Outra grande vantagem de utilizar inoculantes à base de FeSi-Sr, é que a maioria dos inoculantes a base de ferro-silício possuem elevados teores de alumínio o que minimiza qualquer risco de ocorrência deste defeito no material.

2.5 USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

A usinabilidade é o grau de dificuldade de usinar determinado material, está ligado ao desgaste da ferramenta, criando assim a teoria de que um material de alta usinabilidade resulta em vida longa da ferramenta.

Ferros fundidos são ligas ferro-carbono com porcentagem de carbono entre 2 e 4%, contendo ainda outros elementos de liga como o silício, o manganês, o fósforo e o enxofre, além do níquel, cromo, molibdênio e cobre. O ferro fundido cinzento forma cavacos de ruptura, enquanto que os maleáveis e nodulares formam cavacos longos, assim os ferros fundidos são considerados materiais de alta usinabilidade, sendo utilizados em muitos componentes devido a esta sua característica.

A influência dos elementos pode ser dividida em 2 tipos: os formadores de carboneto (cromo, cobalto, manganês, molibdênio e vanádio) que prejudicam a usinabilidade devido ao fato de que os carbonetos são partículas muito duras e abrasivas; e os grafitizantes (silício, níquel, alumínio e cobre) auxiliam na usinabilidade.

3. MATERIAIS E EXPERIMENTOS

Dentro da análise dos efeitos de inoculantes, especificamente no acabamento da superfície e nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento se torna um tanto quanto complexa, visto que os resultados variam de acordo com o processo de fundição, tais como: temperatura de fusão, temperatura de vazamento, composição química da carga fundida, tempo de resfriamento no molde, entre outros. No desenvolvimento deste trabalho se manteve as condições de fusão, composição química e equipamentos, alterando somente os inoculantes utilizados na transferência do material para a panela de vazamento.

Todos os ensaios e análise que fazem parte deste trabalho foi realizado graças a corporação entre a UTFPR e a empresa de fundição MGL em conjunto com o programa de mestrado da instituição, que ofereceram todo o suporte necessário, o material e a produção dos corpos de prova, incluindo toda a estrutura de laboratório de materiais e os equipamentos da oficina de usinagem.

O trabalho divide-se em duas partes, sendo a primeira parte responsável por apresentar todos os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, tal como o ferro fundido cinzento fabricado, os inoculantes utilizados, a máquina do ensaio de usinabilidade, bem como todos os elementos envolvidos. Entretanto, a segunda etapa destina-se ao detalhamento dos ensaios de caracterização e de usinabilidade realizados para a tabulação de resultados.

3.1 O FERRO FUNDIDO CINZENTO DO ESTUDO

No estudo desenvolvido, ativemos ao ferro fundido cinzento GG-25 segundo a norma DIN EN 1561, fabricado sob a forma apresentada na Figura 10.

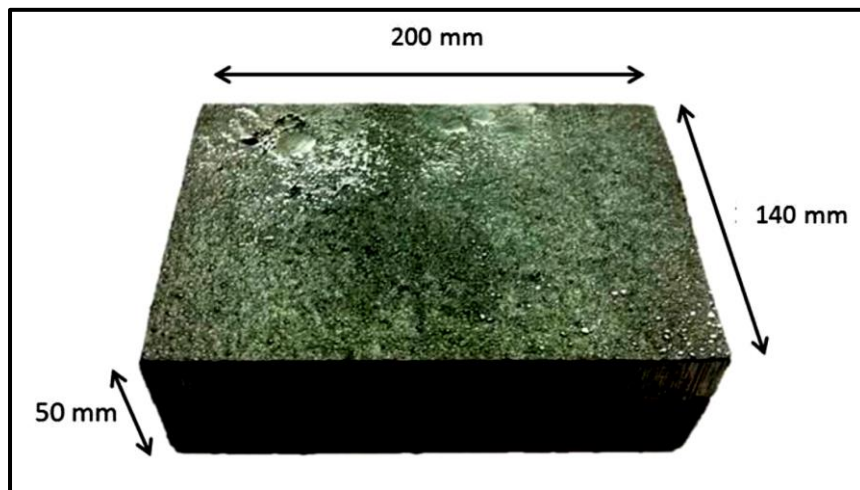


Figura 10– Detalhamento do corpo de prova de ferro fundido cinzento GG-25
Fonte: Autoria própria

3.1.1 FUSÃO

A liga do material utilizado foi preparada em um forno de indução de média frequência com capacidade de 1.000 Kg, conforme Figura 11.



Figura 11– Forno de indução
Fonte: Autoria própria

A composição da carga metálica foi de retorno de ferro fundido cinzento, sucata de aço de estamparia(SAE 1020) e briquete(cavaco de usinagem compactado),na proporção de 30%, 50% e 20% em peso respectivamente. Uma pequena amostra foi retirada em formato de moeda para análise química com temperatura de 1480°C, tendo como finalidade realizar ajuste da composição inicial desejada. A temperatura do forno foi então para 1520°C para homogeneização da composição química do banho e também para excluir variações no grau de nucleação.

3.1.2 INOCULAÇÃO

A inoculação do material foi feita na transferência do fundido para a panela de vazamento, foram adicionados, na proporção de 0,4% do peso, três inoculantes

distintos, um para cada lote de corpo de prova fabricado, sendo um comumente utilizado na indústria de fundição, à base de FeSi-Ba conhecido comercialmente por G20, um à base de FeSi-Ba contendo Zr, comercialmente denominado IM 22 e um à base de FeSi-Sr denominado comercialmente como IMSR 75.

3.1.3 VAZAMENTO

Após processada a inoculação do FC GG-25, o metal líquido foi vazado em moldes de areia para fabricação dos corpos de prova sob a forma de blocos, conforme Figura 12 e Figura 13, utilizados nos ensaios de usinabilidade.

Com o fim de eliminar que variáveis do processo interfiram na qualidade das amostras produzidas, manteve-se a mesma faixa de temperatura de vazamento entre 1380°C a 1410°C, tal como o tempo de vazamento entre 10 e 15 segundos e tempo de desmoldagem entre 45 e 50 minutos. Estes parâmetros são utilizados pela empresa no vazamento de volumes próximos do mesmo material.



Figura 12– Corpos de prova moldados em areia verde
Fonte: Autoria própria



Figura 13 – Caixas com os corpos de prova, moldados, vazada
Fonte: Autoria própria

4. ENSAIOS MECÂNICOS

Segundo Garcia; Spim e Santos (2000) os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material.

Entre as principais propriedades dos materiais obtidas por ensaio, podem-se citar:

- Resistência: Representa por tensões, definidas em condições particulares.
- Elasticidade: Propriedade do material segundo a qual a deformação, que ocorre em função da aplicação de tensão, desaparece quando a tensão é retirada.
- Plasticidade: Capacidade de deformação permanente sem se romper.
- Resiliência: Capacidade de absorção de energia no regime elástico.
- Tenacidade: Reflete a energia total necessária para provocar fratura do material, desde a sua condição de tensão nula.

Através dos ensaios mecânicos que são obtidos informações sobre as características mecânicas dos materiais para que a qualidade do produto seja mais uniforme e permite comparar resultados obtidos em diferentes lugares.

Os critérios de especificação ou escolha de materiais impõem, para a realização dos ensaios, métodos normalizados que objetiva levantar as propriedades mecânicas e seu comportamento em determinadas condições de esforços. Essa norma é fundamental para que se estabeleça uma linguagem comum entre fornecedores e usuários dos materiais.

Dentre os diversos ensaios disponíveis para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, os mais utilizados são os ensaios de tração e compressão. (GARCIA; SPIM). Para a caracterização mecânica do ferro fundido cinzento inoculado, o ensaio de tração para determinar as relações entre tensão e

deformação, ainda o ensaio de rugosidade para analisar o acabamento superficial do material.

4.1 RUGOSIDADE

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. A rugosidade (erros microgeométricos) é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro,

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

1. Qualidade de deslizamento;
2. Resistência ao desgaste;
3. Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
4. Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
5. Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
6. Resistência à corrosão e à fadiga;
7. Vedação;
8. Aparência.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras, são:

1. Imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
2. Vibrações no sistema peça-ferramenta;

3. Desgaste das ferramentas;
4. O próprio método de conformação da peça.

4.1.1 RUGOSÍMETRO

O rugosímetro é uma ferramenta para medir e avaliar micro-irregularidade de uma superfície. Ele pode ser medido com uma precisão que pode chegar ao milésimo de um micron.

Os rugosímetros utilizam filtros passa-alta: Somente freqüências maiores que um valor pré-determinado são analisadas. Esta freqüência pré-determinada é chamada de "cut-off". Sinais com freqüências inferiores à freqüência de "cut-off" são eliminados.

4.1.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força uniaxial no material, tendendo-o a alongá-lo até o momento de sua fratura. Os CPs (corpos de prova) na maioria das vezes são circulares podendo também ser retangulares. O corpo de prova (sempre padronizado por normas técnicas) é fixado pelas suas extremidades nas garras de fixação da máquina de tração. O corpo de prova é então submetido a um esforço, aplicando uma carga gradativa e registrando cada valor de força correspondente a um diferente tipo de alongamento do material (medido por um extensômetro) como mostra a Figura 14.

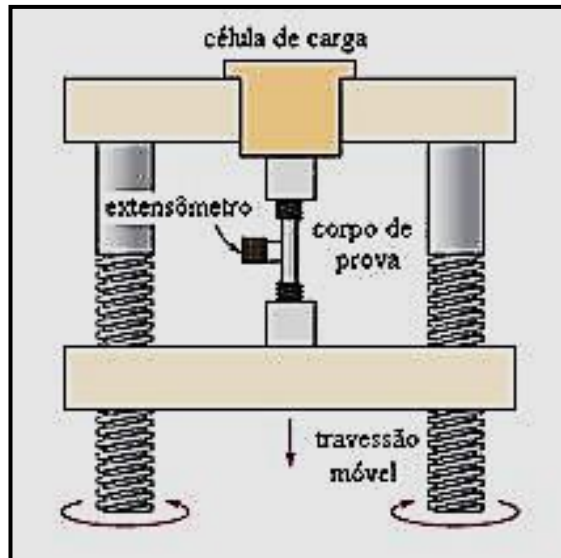


Figura 14 - Ilustração Máquina de Tração
 Fonte: Autor: Infoescola

O ensaio termina quando o material se rompe. Para efeitos de reduzir as diferenças entre as dimensões de diferentes corpos de prova, utiliza-se o conceito de tensão convencional ou tensão de engenharia definido por:

$$\sigma = F / A_0 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde, temos que:

- F = Força aplicada
- A_0 = Área da seção transversal do corpo (antes da aplicação da carga)

Já a deformação sofrida pelo Cp pode ser calculada em função do alongamento sofrido durante o ensaio.

$$\epsilon = (L_f - L_0) / L_0 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde, temos que:

- L_f = Comprimento final

- L_0 = Comprimento inicial

Os resultados obtidos através do ensaio de tração são “plotados” (fornecidos pela própria máquina de ensaio) em um gráfico chamado de tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$), como mostra a Figura 15.

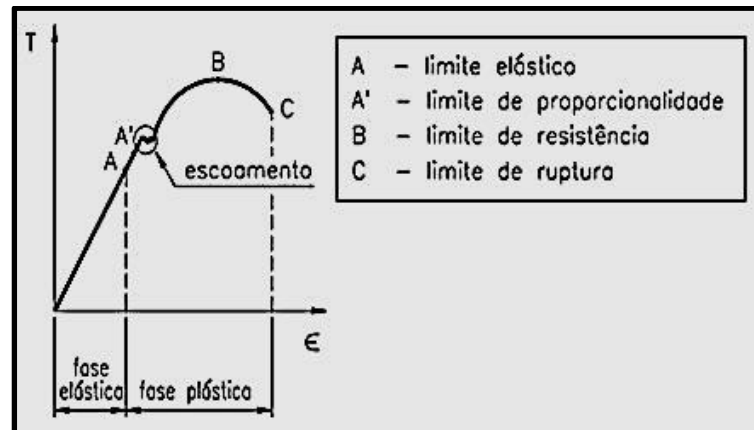


Figura 15 - Gráfico Tensão X Deformação
Fonte: Pieske

Fase elástica: É a fase na qual o material recupera suas dimensões originais após a retirada dos esforços externos sobre ele. A fase elástica obedece a Lei de Hooke representada algebricamente por $\sigma = E \cdot \epsilon$. O “E” representado na fórmula é denominado de módulo de elasticidade ou módulo de Young. É a resistência mecânica do material ou rigidez. O módulo de elasticidade pode ser obtido através da inclinação da reta na fase elástica.

Limite de Proporcionalidade: É o limite no qual as tensões são diretamente proporcionais as deformações.

Escoamento: Início da deformação plástica, consiste propriamente dito em um grande alongamento do material sem acréscimo significativo de carga, com oscilações na velocidade de deformação.

Fase plástica: É a fase a partir do qual o material sofre um deformação permanente (não consegue recuperar suas dimensões originais após a retirada das cargas).

Limite de resistência: Corresponde à máxima tensão que o material suporta sem romper-se. É calculada por:

$$LR = F_{\text{máx}}/S_0 \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

- $F_{\text{máx}}$ = Carga máxima aplicada no material
- S_0 = Área da seção inicial do corpo de prova.

Limite de ruptura: Correspondente ao ponto de fratura do material.

5. RESULTADOS

5.1. RUGOSIDADE

A rugosidade existente na superfície dos corpos de prova, isto após serem submetidos ao processo de fresamento, foi determinada com um rugosímetro do tipo portátil fabricado pela Mitutoyo modelo SurfTest - SJ 10, de acordo com a Figura 16. Este equipamento utiliza um apalpador de diamante com um raio de 5 μm . Nas medições, utilizou-se um comprimento de avaliação de 0,8 mm e foram obtidos os parâmetros R_a , R_z e R_t .

A medição da rugosidade foi realizada sobre a superfície usinada dos corpos de prova obtidos nas velocidades de 1000 m.min⁻¹ (Parâmetro I) e 864 m.min⁻¹ (Parâmetro II), na região correspondente a 50 mm da extremidade do corpo de prova. Para cada material testado, foram realizadas cinco medições na mesma região em cada um dos seis “Passes” efetuado.



Figura 16 - Rugosímetro
Fonte: Autorial Própria

Após todas as medições foi calculado a média e o desvio padrão dos resultados obtidos. A análise dos parâmetros da rugosidade foi realizada de acordo com a Norma Técnica NBR ISO 4287.

Foi avaliado o acabamento da superfície usinada, através da medição da rugosidade nos parâmetros R_a , R_z e R_t , para os três materiais fresados nas duas velocidades de corte experimentadas. As Figuras 17, 18 e 19 evidenciam estes resultados após o fresamento, nas duas velocidades experimentadas, com a ferramenta nova.

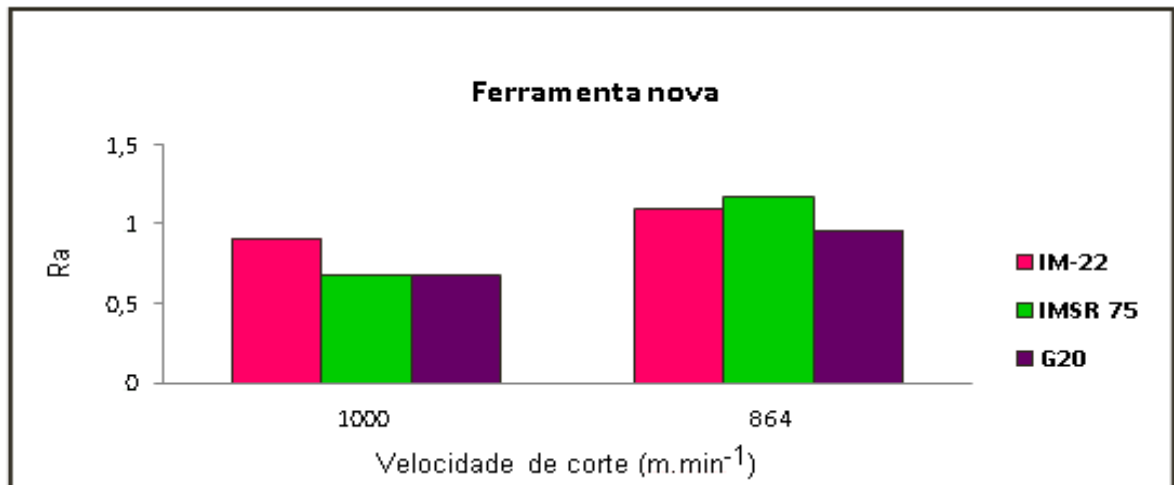


Figura 17 - Rugosidade (R_a); Ferramenta nova
Fonte: Autoria própria

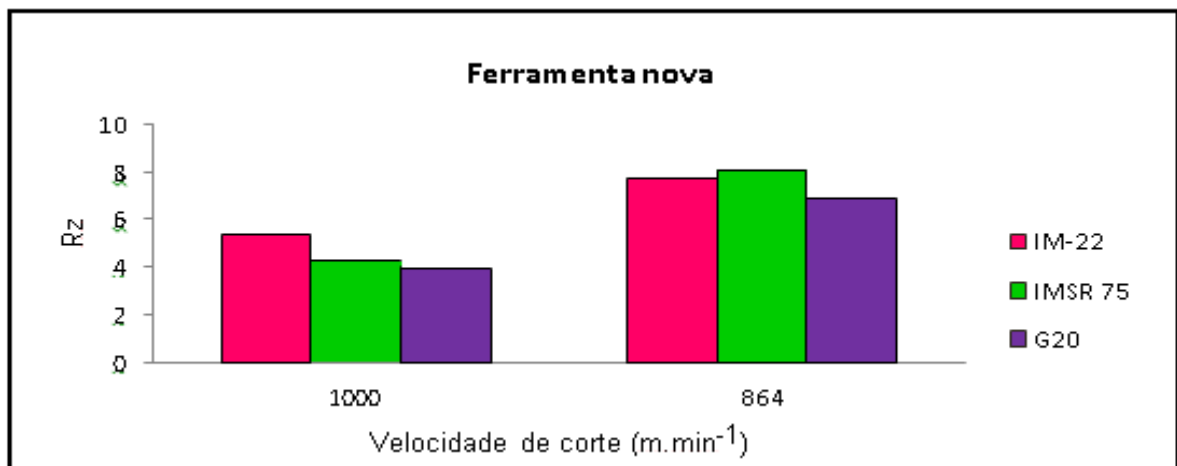


Figura 18 - Rugosidade (Rz); Ferramenta nova
Fonte: Autoria própria

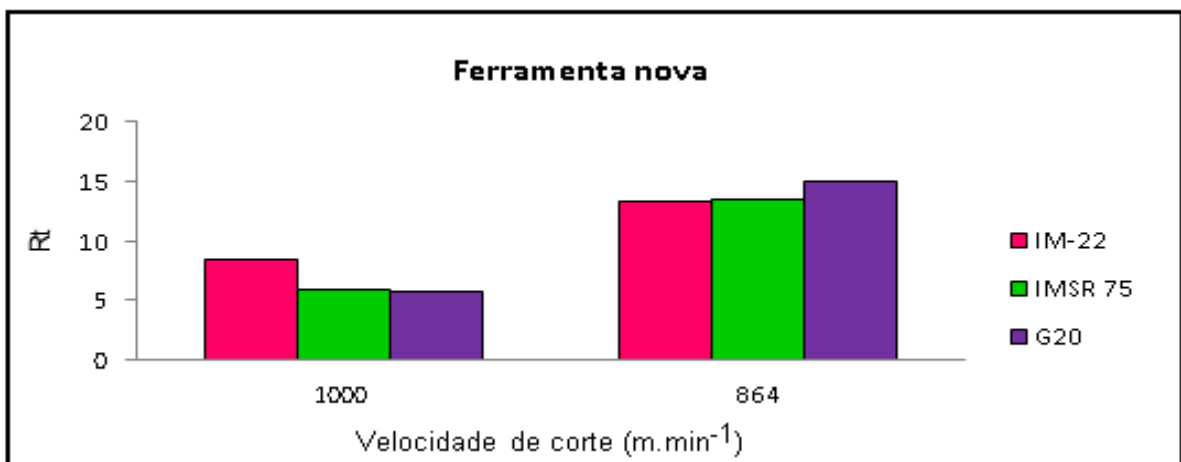


Figura 19 – Rugosidade (Rt); Ferramenta nova
Fonte: Autoria própria

Observa-se através destes resultados que para ambos os materiais os valores de rugosidade encontrados, nos três parâmetros (R_a , R_z e R_t) aumentaram quando houve a redução na velocidade de corte. Contudo, o ferro fundido cinzento GG25 inoculado com IMSR 75 e G20 foram os que apresentaram acabamento superficial mais adequado, assumindo valores de rugosidade mais baixos na velocidade de corte $V_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$. Já para a velocidade de 864 m.min^{-1} os três materiais apresentaram valores bem próximos entre si.

Por outro lado as Figuras 20, 21 e 22 mostram os resultados para os três

parâmetros de rugosidade nas duas velocidades de corte experimentadas, porém utilizando a ferramenta em seu estado de fim de vida útil, ou seja, quando esta atingiu o valor de desgaste de flanco determinado com critério de fim de vida ($V_B=0,3\text{mm}$).

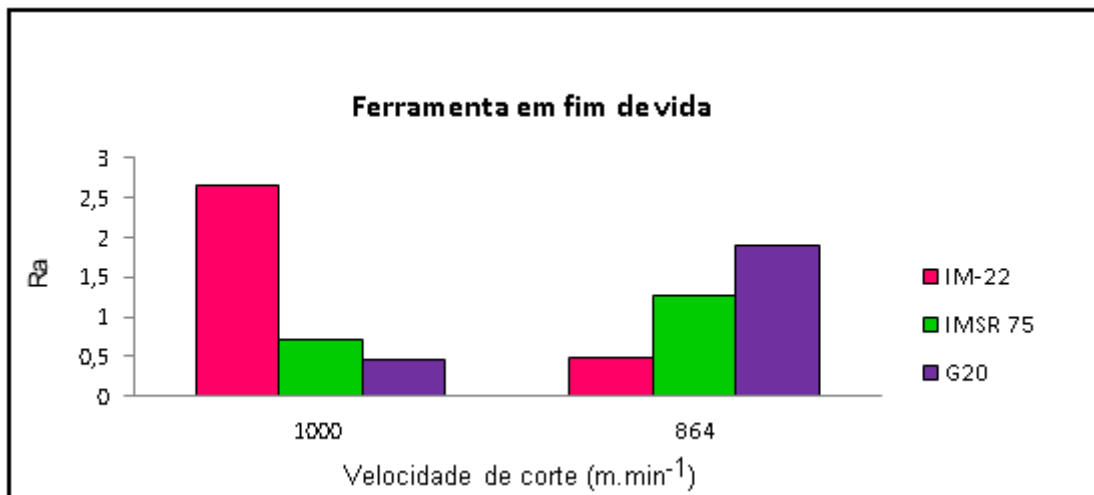


Figura 20 – Rugosidade (Ra); Ferramenta em fim de vida
Fonte: Autoria própria

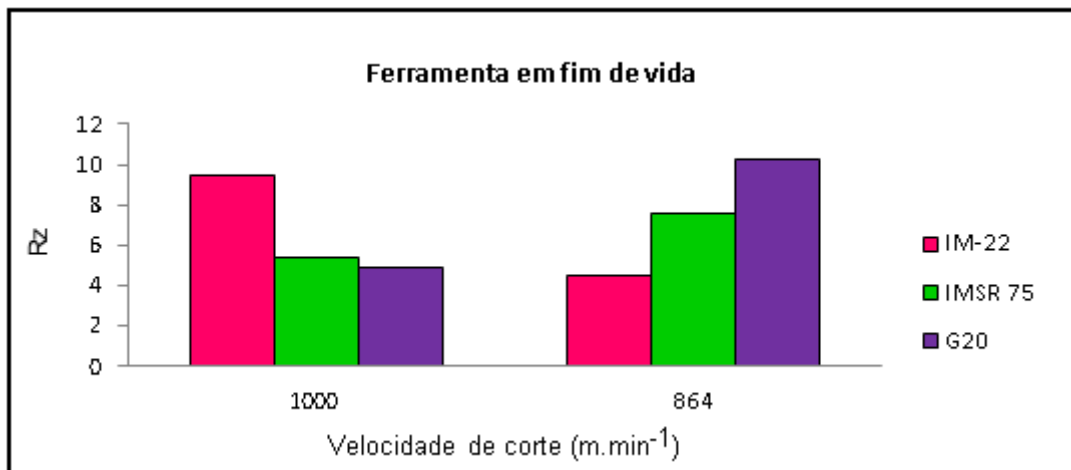


Figura 21 – Rugosidade (Rz); Ferramenta em fim de vida
Fonte: Autoria própria

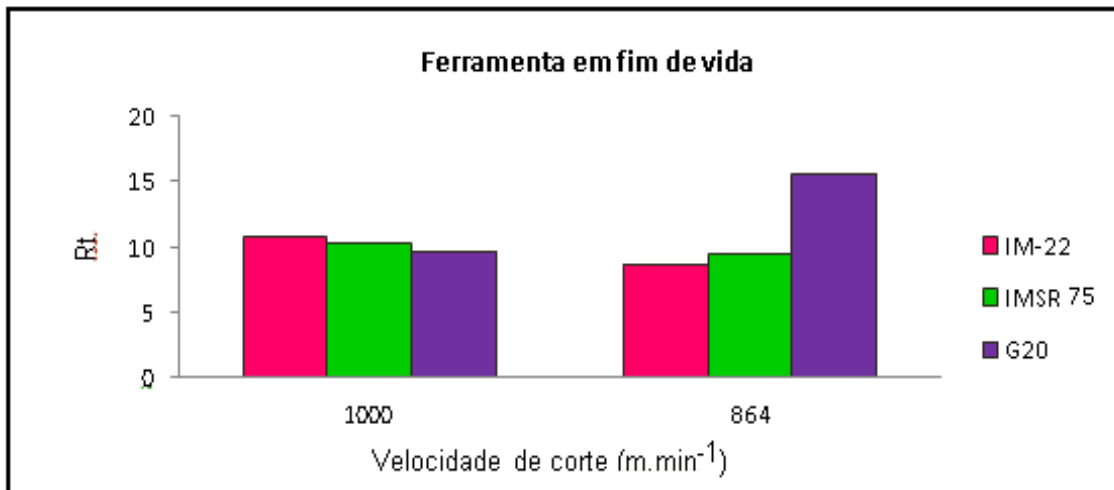


Figura 22 – Rugosidade (Rt); ferramenta em fim de vida
Fonte: Aatoria própria

Quando a ferramenta atinge um desgaste que determina seu fim de vida útil observa-se também um crescimento nos valores de rugosidade, conforme é diminuída a velocidade de corte, exceto para o ferro fundido GG25 inoculado com IM-22. Ainda para a velocidade de 1000 m.min⁻¹ os materiais que apresentaram valores mais baixos nos três parâmetros de rugosidade, foram respectivamente, o FC GG25 inoculado com G20 e IMSR 75. Ao diminuir a velocidade de corte este comportamento é alterado, passando a ser o FC GG25 inoculado com IM-22 o que apresentou valores menores, seguido pelo material inoculado com IMSR75.

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração se referenciaram na norma ASTM D-638-1996 que delimita e especifica condições necessárias para o ensaio. Segundo a norma a velocidade deve ser de 6 mm/min., a temperatura ambiente também deve ser controlada e os dados como hora, temperatura, umidade devem ser especificados.

Os testes foram feitos no Laboratório de Ensaio da MGL Fundição. O equipamento utilizado para a tração foi a máquina de ensaio KRATOS SÉRIE KE conforme mostra a Figura 23.



Figura 23 - Máquina de Ensaio de Tração
Fonte: Kratos Equipamentos

Após a realização dos ensaios, os dados obtidos foram analisados, onde foi possível a construção dos gráficos de tensão-deformação convencional ou de engenharia.

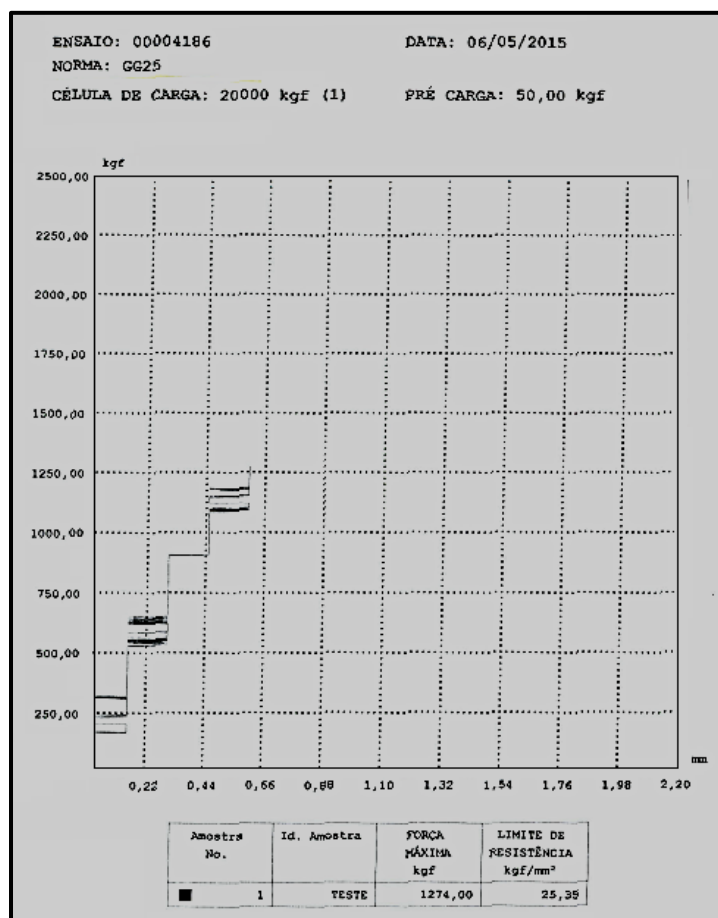


Figura 26 - Ensaio de tração no FFC Inoculado com o IMSR -75
Fonte: Autoria própria

Entretanto para o ferro fundido cinzento inoculado à base de FeSi-Sr denominado comercialmente como IMSR 75, conforme Figura 26, o limite de resistência foi de 25,35 kgf/mm² e força máxima de 1274,00 kgf, também em condições de ensaio com pré-carga de 50 kgf e velocidade de operação da tração de 6 kg/mm²/s.

6. CONCLUSÃO

Conforme os resultados encontrados neste trabalho, podemos concluir que a atuação de inoculantes na fusão de ferros cinzentos, provocaram importantes alterações nas propriedades mecânicas de tração e de usinagem do material (rugosidade).

Portanto quanto ao acabamento superficial do fundido inoculado com IMSR 75, em comparação com os outros dois, podemos observar que foi aquele que gerou uma maior rugosidade devido a diminuição da velocidade de corte, embora seja difícil relacionar um padrão de rugosidade com a taxa de desgaste do inserto.

Porém no ensaio de tração também foi verificado que o ferro fundido cinzento inoculado com IMSR 75 foi o que apresentou ligeira melhor resistência à tração em relação aos outros, mostrando ser até pouco mais viável.

Em geral conclui-se que se torna praticável a aplicação de inoculantes na tendência de melhorias aos ferros fundidos cinzentos e em especial inoculantes à base de FeSi com Sr que apresentou melhores resultados que o já usado G-20 e o outro testado IM – 22.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6593. **Morfologia de grafita em ferro fundido**. 1981.

BOEHS, L. **Análise de superfície usinada, Apostila do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica**. Florianópolis, SC, 1999.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ªed. São Paulo: ABM, 1988.

COELHO, R. T; OLIVEIRA, J. F. G; SUDO, T. T; WISE, M; BRAGHINI Jr, A. **O desgaste de ferramentas na usinagem de ferro fundido cinzento a alta velocidade**. O mundo da usinagem, vol 1, 2001.

COLLINI, L; NICOLETTO, G; KONECNA, R. **Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron; Materials Science and Engineering**. A 488, 2008.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 4ª Edição, Artliber editora, São Paulo, 2003.

GUEDES, Luis Fernando de Camargo. **Avaliação de alguns tipos de inoculantes em ferros fundidos cinzentos com diferentes teores de enxofre**. 2007. 90 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Fundição). Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC e Instituto Superior Tupy – IST. Joinville, 2007.

MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinabilidade dos materiais**. 2ª Edição, Editora Blucher, São Paulo, 2011.

MAZIERO, I; MADEIRA, W. **Nucleação dos Ferros Fundidos Cinzentos**. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia de Fundição). Universidade Federal de Ponta Grossa e Instituto Superior Tupy, Joinville, Santa Catarina, 2004.

NAVES, V.T.G.; SILVA M.B. **Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados ao CrCuSn e ao CrCuSnMo e vermicular classe 350 através do monitoramento de sinais de vibração e potência de corte**. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

SOUZA, SANTOS, A. B; CASTELO BRANCO, C. H. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. 3ª ed. São Paulo: IPT, 1989.

VILELA, F. J; LEBRÃO, S. G; FUOCO, R; VICENTE, A. A e MELO, G. H. T. **Efeito de algumas variáveis de processo na obtenção do ferro fundido nodular ferrítico no estado bruto de fundição**; Humanidades & Tecnologia em Revista, Ano IV Vol. 4, 2010.