

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS DO FERRO
FUNDIDO EM UM COMPONENTE PANTOGRÁFICO
DE SEMEADORA PARA AGRICULTURA DE
PRECISÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sirnei César Kach

Santa Maria, RS, Brasil

2014

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS DO FERRO FUNDIDO EM UM COMPONENTE PANTOGRÁFICO DE SEMEADORA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Sirnei César Kach

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Área de Concentração Máquinas Agrícolas Desenvolvidas para Agricultura de Precisão, do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agricultura de Precisão.**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Kach, Sirnei César

Estudo das tensões residuais do ferro fundido em um componente pantográfico de semeadora para agricultura de precisão. / Sirnei César Kach.-2014.
95 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2014

1. Pantógrafo 2. Solo 3. Resistência 4. Tensão. Molde
5. Ferro fundido I. Amado, Telmo Jorge Carneiro II.
Titulo.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Sirnei César Kach. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Chafariz, 613 – Ap. 02. Centro, Horizontina, RS. CEP: 98920-000.

Fone: (0xx)55 8107-8220; E-mail: sirneikach@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Colégio Politécnico
Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS DO FERRO FUNDIDO EM UM
COMPONENTE PANTOGRÁFICO DE SEMEADORA PARA
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Elaborado por:
Sirnei César Kach

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agricultura de Precisão

COMISSÃO EXAMINADORA:

Telmo Jorge Amado Carneiro Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Richard Thomas Lermen Prof. Dr. (FAHOR)

Arno Udo Dallmeyer Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, 16 de setembro de 2014.

Dedico esta pesquisa a minha esposa Katiussa e minhas filhas, Thainá e Giulia, parceiras incondicionais que sempre apoiaram minha dedicação à pesquisa, estudos e ao trabalho, sabendo que este empenho sempre foi em busca de uma melhora de vida e a satisfação pessoal na realização dos sonhos e projetos pensados em conjunto.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Colégio Politécnico da UFSM, ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP) e aos Professores pelos ensinamentos compartilhados e dedicação.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado, que sempre esteve presente ajudando e apoiando quando necessário, entendendo as dificuldades e contribuindo para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores: Dr. Richard Thomas Lermen e Dr. Arno Udo Dallmeyer que gentilmente aceitaram o convite para participarem da comissão examinadora deste trabalho.

Agradeço a minha esposa e filhas pelo apoio incondicional e compreensão pelos vários momentos de ausência, seja em viagens de estudo, pesquisa e acompanhamento do projeto junto à empresa proprietária do projeto, tudo em função da dedicação a este trabalho.

A empresa Magma, especialmente ao Adm. Reinaldo Oliveira e o Eng. Matheus Miragaia pelo suporte e envolvimento na realização de ensaios através do software de simulação numérica, coleta e compilação de dados a partir da simulação do processo de fundição do suporte pantográfico. Uma troca de experiências e informações de grande valia ao aperfeiçoamento profissional e formação na área de fundição aliada à agricultura de precisão, mais especificamente em máquinas agrícolas.

Agradecimento especial à empresa Metalúrgica Candeia Ltda, mais precisamente ao Diretor Nestor Neitzke, pela viabilidade e disponibilização do software de simulação numérica. Também ao estagiário e acadêmico de engenharia Samuel Jablonski, pelo suporte na criação dos leiautes com os vários sistemas de alimentação, para viabilizar o melhor sistema a ser simulado.

A empresa Valtra, nas pessoas de Júlio Reguelin, gerente de engenharia e Cassiano Zanatta, engenheiro responsável pelo projeto, que permitiram a utilização do suporte do pantógrafo como objeto de ensaios e pesquisa.

À empresa CHG, na pessoa de Jaílson Costa principalmente, que no período em que atuei como gerente industrial, disponibilizou horários que viabilizaram minha participação no mestrado em sua fase inicial.

Aos amigos Juliano e Diego, que abriram as portas de sua casa, nos auxiliando nas inúmeras noites que estivemos em Santa Maria em função das aulas do mestrado e precisando de um canto para repousar.

Aos pais, muito obrigado pela vida, educação e formação pessoal. A determinação e humildade em nossas ações e busca constante da evolução pessoal e profissional, vem de berço!

A todos citados anteriormente, muito obrigado, pois, em algum momento e de alguma forma, participaram do desenvolvimento deste trabalho.

“Olha a terra a tua volta, deita-te no chão
e sente o coração do planeta a bater.”

Paulo Coelho

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS DO FERRO FUNDIDO EM UM COMPONENTE PANTOGRÁFICO DE SEMEADORA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

AUTOR: SIRNEI CÉSAR KACH
ORIENTADOR: PROF. DR. TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Data e local da defesa: Santa Maria, 16 de setembro de 2014.

Este trabalho tem por principal finalidade realizar um estudo através da utilização do software de simulação numérica Magma, para verificação das tensões residuais provocadas pelo processo de fundição, no suporte do pantógrafo da semeadeira utilizada na agricultura de precisão. Esta necessidade surge em função de quebra de peças em testes de bancada realizados anteriormente na fase de desenvolvimento do protótipo, sinalizando a possibilidade de uma possível fragilização do componente em função do excesso de concentração de tensões residuais no item ou esforços aplicados. A metodologia utilizada foi através da realização de simulações com uso do software de simulação numérica, que analisou duas propostas para fundição das peças. A primeira possui três peças por molde e a segunda com duas peças por molde. Este perfil da distribuição de peças no molde tende a provocar um comportamento diferenciado entre as duas propostas e com isso verificar qual apresenta o melhor resultado, ou seja, menor concentração de tensões residuais formadas durante o processo de fundição. A partir da simulação numérica realizada, onde se considerou as principais variáveis, a disposição de peças no molde, temperatura de desmoldagem que respeitou a fase eutetóide de 730°C, obtiveram-se resultados satisfatórios já que a concentração de tensões residuais baixas, concentrando-se em torno de 50MPa e o item por sua vez projetado para suportar até 320 MPa de esforços aplicados. Os resultados comprovam que mesmo tendo diferentes quantidades de peças por molde, consequentemente diferenças de volume de metal líquido vazado, não houveram variações na concentração das tensões residuais na peça que pudessem de alguma forma comprometer o desempenho em sua aplicação. Conclui-se portanto que a concentração de tensões residuais com máximo de 50MPa, não afeta o seu desempenho em função da exigência de esforços sofridos pela peça no sistema pantográfico da semeadeira. Podendo desta forma, ser utilizada com segurança e garantia de o produto atenderá a demanda de esforços e exigências de carga para a qual foi projetada.

Palavras-chave: Pantógrafo. Solo. Resistência. Tensão. Molde. Ferro fundido.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Graduate Program in Precision Agriculture
Federal University of Santa Maria

STUDY OF THE IRON INTEND DEPENDING ON THE STRENGTH OF SOILS AND EFFORTS OF APPLICATION IN A COMPONENT OF PANTOGRAFIC PLANTER FOR AP

AUTHOR: CÉSAR, SIRNEI KACH
SUPERVISOR: PROF. DR. TELMO AMADO JORGE CARNEIRO
Date and place of defense: Santa Maria, September 16th, 2014.

This work takes for finality main Magma carries out a study through the use of the software of numerical simulation, for checking of the residual tensions provoked by the process of fusing, in the support of the pantograph of the plant machines used in the agriculture of precision. This necessity appears in function of break of pieces in fulfilled row of seats tests previously in the phase of development of the prototype, signaling the possibility of a possible weakening of the component one in function of the excess of concentration of residual tensions in the item or hard-working efforts. The used methodology was through the realization of simulations with use of the software of numerical simulation, that it analyses two proposed for fusing of the pieces. The first one has three pieces for mold and on Monday with two pieces for mold. This profile of the distribution of pieces in the mold has a tendency to provoke a behavior differentiated between two proposals and in spite of the fact that that checks which presents the best result, in other words, less concentration of residual tensions formed during the process of fusing. From the fulfilled numerical simulation, where was considered the main variables, at pieces disposal in the mold, temperature of desmoldagem what respected the phase eutetóide of 730°C, satisfactory results were obtained since the concentration of low residual tensions, concentrating around 50MPa and the item for his time projected to support up to 320 MPa of hard-working efforts. The results prove what even taking different quantities of pieces as a mold, consequently you distinguish of volume from emptied liquid metal, there were no variations in the concentration of the residual tensions in the piece that could in some form compromise the performance in his application. one concludes so that the concentration of residual tensions with maximum of 50MPa, does not affect his performance in function of the demand of efforts suffered by the piece in the system pantograph of the plant machines. Being able in this way, to be used with security and guarantee of the product will attend the demand of efforts and demands of load for which was projected.

Keywords: Pantograph. I go flat. Resistance. Tension. Mold. Cast iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática dos tipos de esforços ao qual está exposto determinado corpo	21
Figura 2 – Ilustração microscópica da grafita	25
Figura 3 – Ilustração da cementita	26
Figura 4 – Grafita lamelar do ferro fundido cinzento	27
Figura 5 – Grafita esferoidal do ferro nodular	27
Figura 6 – Morfologia da grafita dos ferro fundidos cinzentos	29
Figura 7 – Tamanho da grafita lamelar.....	29
Figura 8 – Morfologia da grafita nos ferros fundido nodulares	31
Figura 9 – Micrografia dos tipos de grafita dos ferros fundidos	32
Figura 10 – Tamanhos da grafita esferoidal do ferro nodular.....	33
Figura 11 – Metalografia com e sem utilização de inoculante	37
Figura 12 – Escala da máxima tensão residual simulada.....	41
Figura 13 – Representação da distribuição de temperatura.....	44
Figura 14 – Representação da distribuição de temperatura.....	45
Figura 15 – Diferentes microestruturas em função da variação de temperatura	46
Figura 16 – Estrutura granular.....	52
Figura 17 – Representação da estrutura alveolar do silte	53
Figura 18 – Partículas da argila carregadas negativamente	53
Figura 19 – Conjunto montado do pantógrafo	58
Figura 20 – Primeiro projeto do suporte pantográfico	61
Figura 21 – Versão atualizada do pantógrafo.....	62
Figura 22 – Geometrias propostas de vazamento.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do ferro fundido cinzento	28
Tabela 2 – Composição dos elementos químicos do ferro fundido nodular	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	– Alumínio
AP	– Agricultura de precisão
ASTM	– American Society for Testing and Materials
C	– Carbono
CAD	– Projeto auxiliado por computador
Ceq	– Carbono equivalente
DIN	– Deutsches Institut für Normung
FoFo	– Ferro fundido
FAHOR	– Faculdade Horizontina
FEA	– Análise de elementos finitos
Fe-C-Si	– Ferro carbono silício
Fe-C-Si-Mg	– Ferro carbono silício magnésio
HB	– Número Brinell de dureza
Mg	– Magnésio
MgS	– Sulfeto de magnésio
Mn	– Manganês
MO	– Material orgânico
MPa	– Mega Pascal
N/m ²	– Newtons por metro quadrado
P	– Fósforo
Pa	– Pascal
PD	– Plantio direto
PPGAP	– Programa de pós graduação em agricultura de precisão
RS	– Rio Grande do Sul
S	– Enxofre
Si	– Silício
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Diagrama de fase Fe-C	81
Anexo B – Temperatura de desmoldagem	82
Anexo C – Formação da fase ferrita	83
Anexo D – Propriedade mecânica dos materiais	84
Anexo E – Deslocamento dos materiais	85
Anexo F – Intensidade do deslocamento.....	86
Anexo G – Tensões de von Mises	87
Anexo H – Tensão principal A.....	88
Anexo I – Tensão principal B.....	89
Anexo J – Critério de trinca a frio 01	90
Anexo K – Critério de trinca a frio 02	91
Anexo L – Curvas de resistência.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Tensões do ferro fundido	19
2.1.1 Ligas ferrosas	24
2.1.2 Elementos estruturais do ferro fundido	26
2.1.3 Ferro fundido cinzento	28
2.1.4 Ferro fundido nodular	30
2.1.5 Nodularização do fundido	35
2.2 Simulações através de cálculo numérico das tensões dos materiais	37
2.3 Tensões e resistência dos solos	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA	57
3.1 Resultados e discussões	57
3.1 Projeto do pantógrafo	58
3.2 Magma - Software de simulação numérica	59
3.3 Objetos de ensaios	60
3.3.1 Primeira versão do projeto do pantógrafo na semeadeira	60
3.3.2 Novo projeto do suporte do pantógrafo	61
3.4 Processo de fundição para fabricação das peças	62
3.4.1 Placa em produção	64
3.4.2 Placa de estudo	64
3.5 Análise da solidificação	65
3.5.1 Temperatura de desmoldagem	67
3.5.2 Fração de ferrita	68
3.5.3 Propriedades mecânicas	69
3.6 Análise das tensões residuais dos materiais	70
3.6.1 Deformações	70
3.6.2 Intensidade do deslocamento	71
3.7 Tensões de von Mises	73
3.8 Tensão residual principal	74
3.8.1. Critério de trinca a frio	75
3.8.2 Gráfico de tendência a formação de trinca a frio	76
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	77
ANEXOS	80
REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento em relação aos diferentes tipos de materiais e suas aplicações, auxiliam na definição do perfil otimizado a ser aplicado na construção de conjuntos e subconjuntos para a criação de máquinas e utensílios para determinada aplicação. A criação de equipamentos e máquinas parte da necessidade de um processo produtivo que vai sendo ajustado com o passar do tempo e de acordo com a evolução tecnológica que é apresentada. A partir disso, a definição de geometria de um componente, parte muitas vezes de conceitos e resultados de outras experiências, que servirão de base na definição da melhor forma para tal, como por exemplo a redução de peso de um componente em função da melhoria da resistência dos materiais.

Em função da alta demanda de máquinas e equipamentos agrícolas pelo mercado agrícola, a utilização da tecnologia no sistema produtivo destas e na fabricação de componentes, é importante ao método de análise e verificação da qualidade do produto utilizado. Por conta desta evolução tecnológica os sistemas de fabricação possuem adequação constante a necessidade de melhorias de produtos e processos. Os ensaios a serem verificados por este trabalho contemplam parte desta necessidade, onde a eficácia do método da definição do projeto é importante e precisa de uma base de dados e resultados que evidenciem esta condição.

O estudo apresentado foi com foco direcionado exclusivamente a análise dos resultados das simulações de um componente de plantadeira, com utilização do software de simulação numérica (Magma), para verificação das tensões residuais em uma peça de ferro fundido, levando em conta duas propostas para o sistema de alimentação do molde no processo de fundição.

Com base técnica de pesquisa e normas de construção, leva-se em conta a funcionalidade e resistência na aplicação, bem como o peso do componente ou conjunto aplicado na semeadeira. A utilização de materiais leves facilita a manipulação do objeto aumentando sua eficácia de forma gradativa, desde que adequado a solicitação de esforços durante o processo do plantio.

Estudar a resistência dos materiais é saber até quando se podem considerar os esforços para uma determinada peça, seu desempenho ótimo na aplicação,

considerar as possíveis causas de falhas e com isso evitar que elas continuem ocorrendo na peça. Muitas vezes uma peça falha não porque está desgastada, mas sim, porque trabalhou em condições inadequadas, ou seja, fora das condições de projeto ou por erro deste, sofrendo sobrecargas e ações de forma incorreta, seja de esforços ou falta de manutenção adequada. Se uma peça é projetada para determinado tipo de trabalho, é nessas condições que a mesma deve permanecer durante o funcionamento do equipamento, pois há um parâmetro técnico normatizado que lhe garante esta condição de aplicação e resultado de desempenho no campo. A manutenção na maioria dos casos é o diferencial na longevidade do item ou conjunto utilizado. Para conhecer as condições de trabalho de uma peça é importante saber e compreender a resistência da mesma, verificando se a aplicação está de acordo com a necessidade do projeto e sua aplicação.

Para definir a capacidade de resistência dos materiais, é preciso levar em conta sua resistência ao esforço, realizando ensaios que possam mostrar esta condição antes da definição final do projeto. Um dos métodos utilizados é análise da composição química, que a partir de determinada norma identifica uma estrutura metalográfica que direciona a característica do material referente a esforço solicitado. Os ensaios de tração e impacto, podem evidenciar por meio de relatório específico de cada ensaio, a característica do material ao esforço de aplicação da peça, respeitando as tolerâncias já determinadas para cada classe de fundido, segundo Bento et al. (2007).

De acordo com Silva et al. (2000), a estruturação de um conjunto de máquina, precisa de inúmeros estudos que por sua vez deverão levar em conta as tensões naturais e de construção do material. Essas tensões podem sofrer alterações em seus pontos de ocorrência, de acordo com a geometria da peça, sistema de alimentação e resfriamento no caso do ferro fundido nodular, produto específico desse estudo. Caso o material definido não atenda exatamente a exigência do componente em relação ao esforço a que será submetido, poderão ser adicionados outros tratamentos superficiais ou mais profundos no material, alterando parcialmente a estrutura molecular da estrutura inserindo uma maior capacidade de resistência a grandes esforços, no caso a têmpera, nitretação, cementação, etc.

No caso do projeto em desenvolvimento, o estudo foi baseado no pantógrafo, fabricado em ferro fundido nodular (GGG50), da plantadeira utilizado no sistema de plantio direto (PD), uma análise dos possíveis pontos de tensão naturais da

formação estrutural foi realizada, comparando com os esforços que o solo oferece e esforço de aplicação da máquina. O objetivo principal é identificar quais são os fatores que possibilitam variações das tensões residuais que venham comprometer o desempenho do item em função de pontos de fragilização por conta das tensões residuais.

A necessidade de simulações das tensões neste produto justifica-se pela importância de identificar as tensões residuais no produto, que por sua vez venham afetar o desempenho do mesmo, considerando os esforços de aplicação e alto volume de produção previsto. Identificando desta forma possíveis acúmulos de tensões, possibilitando antecipar-se a contenção do problema evitando perdas ao projeto.

A linha de pesquisa definida neste estudo é relacionada as máquinas agrícolas desenvolvidas para agricultura de precisão e que objetiva o estudo de sistemas mecanizados desenvolvidos para a melhor utilização das máquinas existentes no mercado, com o intuito de melhor gerenciamento da atividade agrícola e integração com o meio ambiente e usuários.

A semeadeira pode ser utilizada em um sistema de agricultura de precisão, em função desta característica e a linha de pesquisa, a opção foi estudar as tensões considerando que poderia ser um fator comprometedor da eficácia da máquina no campo. Um plantio preciso não depende somente de solos ou equipamentos eletrônicos, mas sim de uma estrutura que suporte todo sistema e entre estes os componentes metálicos, no caso da pesquisa o ferro fundido nodular, do suporte pantográfico da máquina.

O pantógrafo é fabricado em ferro fundido nodular, no processo de fundição com molde em areia verde, vazado por gravidade. Esse item por sua vez sofre grande esforço na sua aplicação na plantadeira, condicionando desta forma, a necessidade de uma composição micro estrutural resistente a esforços de alta intensidade. Este componente tem como função garantir a homogeneidade da distribuição correta da semente no solo, garantindo a correta distribuição bem como a profundidade do grão no solo, segundo a revista técnica da New Holland (2010).

Segundo Sequinato et al. (2000), a estrutura do solo varia de acordo com sua composição química e estrutural bem como o sistema de plantio e manejo aplicado na área. Ocorre uma variação importante e significativa dos tipos de solos, variando de cada região do país, em função da mudança da composição destes. Comparando

regiões norte com o sul do Brasil, a composição e estruturação de solos são muito variadas, podendo ocorrer diversos tipos em uma única região.

A definição e aplicação do coeficiente de segurança, deve levar em conta critérios específicos para a máquina e que contemplem a estrutura formadora dos solos e variáveis que possam interferir no processo de plantio desta máquina. Estes critérios podem ser definidos em função do tipo de solo e variações de terreno, bem como a intensidade de utilização do equipamento no plantio. A estrutura do solo precisa ser considerada pelo esforço que a máquina sofrerá em pontos específicos, para rompimento do solo, condicionando o plantio de forma adequada.

A necessidade de aumento e a demanda crescente no consumo de alimentos, a necessidade de rendimentos competitivos na agricultura e a preocupação com a preservação ambiental podem encontrar na agricultura de precisão (AP) uma resposta eficiente, uma vez que ela é uma ferramenta de gerenciamento e tomada de decisões em constante evolução tecnológica que conduz ao aumento da eficiência da utilização dos recursos no sistema produtivo, seja no plantio, manutenção da lavoura ou colheita, de acordo com Amado et al. (2007).

É muito importante considerar, portanto, na construção de um componente, qual a intensidade de força aplicada por sua funcionalidade, definição correta da melhor geometria com intuito de eliminar pontos de tensão. Na criação de uma máquina, seja plantio, pulverização ou colheita, existe uma gama enorme de dados e informações que precisam ser consideradas para que seja um projeto eficaz em sua aplicação. Desde o formato ergonômico do equipamento, sua estrutura para suportar demais componentes, composição dos materiais, aplicação de tecnologias e ambiente de trabalho.

Os principais objetivos desta pesquisa das tensões residuais do ferro fundido em seu processo de fabricação, é identificar as dificuldades caso venham a ser comprovadas, no desempenho da semeadeira para agricultura de precisão em função dos esforços aplicados e que provenham da resistência do solo e processo de plantio. Verificar se o cálculo estrutural esta atendendo as tensões admissíveis de aplicação do sistema pantográfico com base nos dados repassados pelo fabricante. Desta forma evidenciar a condição do projeto levando em conta o que o processo de fundição poderá auxiliar modificando seu processo e com isso garantir a aplicação correta do componente da semeadeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a revisão da literatura utilizada na estruturação, pesquisa e estudo desse trabalho, análise de dados e resultados referentes a pontos de tensão de materiais, resistência dos solos e esforço aplicado na utilização do componente da semeadeira.

A identificação de variáveis e de todas as possibilidades de comprometimento do funcionamento correto do equipamento. Pontualmente a pesquisa baseia-se em um componente, mas com intenção de evidenciar a complexidade que envolve um projeto dessa natureza para que seja o mais preciso possível e atenda a exigência da aplicação.

2.1 Tensões do ferro fundido

Nos últimos anos, as indústrias de fundição têm sofrido grandes mudanças no seu perfil de fornecedor de componentes ou conjuntos montados, passando de uma simples empresa de subcontratação para uma fornecedora de produtos e serviços de alta tecnologia em função da evolução dos equipamentos e composição de materiais, participando ativamente do desenvolvimento de componentes junto ao cliente. O cliente normalmente tem um projeto por conta de uma necessidade de mercado, mas sua especialização é de construção de determinado equipamento, porém, o suporte técnico da estrutura dos componentes de sua máquina, precisam do suporte de quem entende da técnica específica.

Conforme Oliveira et al. (2009), este processo, aliado à forte concorrência do mercado de fundidos, obriga de certa forma as fundições a oferecerem produtos e serviços cada vez melhores, mais baratos e muitas vezes em um espaço de tempo que há pouco seria inconcebível. Uma resposta imediata e de alta qualificação dos processos e materiais disponíveis. Graças ao uso de ferramentas de simulação numérica do processo de fundição (*softwares* CAE), apenas algumas empresas têm conseguido atuar com sucesso nesse cenário. Empresas de grande porte no Brasil

utilizam a simulação do processo de fundição que vem sendo empregada no desenvolvimento de produtos há muitos anos, o que evidencia uma evolução de seus processos e com produto de qualidade superior. Ao longo desse trabalho de pesquisa e otimização de processos de fabricação, muita experiência vem sendo acumulada, se refletindo em mais qualidade e economia de tempo e recursos no ciclo de desenvolvimento, conforme Oliveira et al. (2003).

De acordo com Mascia (2006), as peças ou componentes de um determinado conjunto ou estrutura, devem ter geometria adequada e definida, além da definição do tipo de material para resistirem às ações do tempo, força em sua estrutura impostas sobre elas. Seja interferência do tempo bem como de esforços de maior ou menor intensidade, o projeto precisa pensar ao determinar os materiais a serem utilizados, bem como o tipo de material a ser usado. Desse modo, por exemplo, as paredes de um reservatório de pressão têm resistência apropriada para suportarem as pressões internas; a geometria de uma peça que sofre esforço de corte exposta à ação de desgaste, por exemplo, a ponteira da plantadeira. Se o material não resistir às ações e romper, diz-se que ele atingiu um estado limite de resistência, no caso, por ruptura. Esse limite de resistência varia de acordo com sua aplicação, que possuem maior ou menor intensidade, pois no exemplo citado da ponteira, o desgaste é grande devido ao atrito intenso com o solo.

Segundo Chiaverini (1986), as propriedades mecânicas dos materiais constituem os característicos mais para aplicação da engenharia na construção de máquinas e equipamentos. As propriedades mecânicas de um material definem seu comportamento quando aplicado em determinado esforço ou utilização e para atender sua necessidade, inúmeros ensaios, pré-montagem, devem ser realizados para garantir o resultado esperado. Definem sua capacidade de resistir ou transmitir esforços a qual são aplicados, sem romper ou apresentar deformações incontroláveis.

Outro fator importante e que é aplicado no alinhamento técnico estrutural de um produto, segundo Melconian (1999), a tensão admissível é a condição ideal de trabalho para o material de acordo com a circunstância apresentada, pela aplicação de determinado produto. Essa tensão deverá ser mantida na região de deformação elástica do material, caso aproxime-se da região plástica, o cálculo estrutural deverá ser revisto em função das forças aplicadas no conjunto. A tensão admissível é

determinada através da relação entre a tensão de escoamento e coeficiente de segurança.

Segundo Baêta e Sartor (1999), as forças que atuam em uma determinada peça, são parcelas de forças interiores de um corpo denominadas tensões ou solicitações. Existem dois tipos de tensões:

- tensões normais (tração e compressão): são as que atuam na direção perpendicular à seção transversal da peça e podem ser de tração ou compressão variando de acordo com a aplicação.
- tensões de cisalhamento ou de corte: são as forças que atuam tangencialmente a seção transversal da peça da plantadeira ou qualquer equipamento que sofra tal esforço.

Na Figura 1, ilustram-se os esforços que podem ser sofridos pelo componente montado na máquina de PD, em estudo.

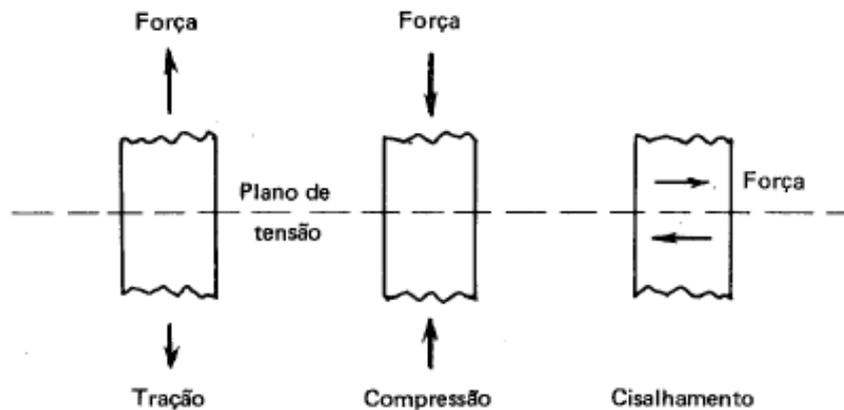


Figura 1 – Representação esquemática dos tipos de esforços ao qual está exposto determinado corpo

Fonte: Chiaverini (1986).

Os esforços mecânicos são os mais variados, podem significar a aplicação de um esforço gradual e lento, neste caso a natureza da força é estática, como desdobraimento, torção, compressão e tração. A aplicação de carga também pode ser repentina, como um choque, por exemplo. Nesse caso, é uma aplicação de força dinâmica. Quando o esforço for repetitivo, descreve-se uma ação por fadiga, repetindo-se seja em valor ou direção. Para tal entendimento e prevenção de perdas

ou danos ao projeto, utilizam-se os ensaios mecânicos de laboratório para verificação de sua condição e propriedades, conforme Chiaverini (1986).

Quando ocorrer aumento da força externa gradativa, o mesmo provocará a ruptura ou destruição da peça, caso ela não esteja projetada para tal intensidade de esforço. A tensão da carga máxima calculada que é identificada e que o corpo em questão suporta em sua aplicação, e a seção transversal original, denomina-se tensão de ruptura ou tensão estática, de acordo com Baêta e Sartor (1999).

As variáveis dos valores de tensão e deformação podem ser obtidas através do ensaio de tração utilizando um corpo de prova, a partir desse ensaio e os dados apresentados, pode-se criar um diagrama de tensão-deformação através de um gráfico de verificação sugerindo a aplicação do referido material, segundo Hibbeler (1997).

De acordo com Beer et al. (1996), os carregamentos aplicados à determinada estrutura, podem ser de pressão compressão ou axiais, ou seja, múltiplos carregamentos gerando determinados efeitos de acordo com a carga aplicada provocando deformação compatível ao esforço aplicado e que por sua vez apresenta reação dentro do padrão de composição da sua estrutura molecular.

Segundo Franklin (2009), as tensões apresentadas pelo ferro fundido podem ser aliviadas com procedimento onde é feito um novo aquecimento até 1200°C por 30' onde ocorre uma redução dos pontos de tensão, mas é importante lembrar que este processo pode alterar a estrutura molecular e fragilizar de outra forma a peça. Por exemplo, uma peça que possua pontos de tensão e possibilidade de fragilidade, se aquecidos, obviamente eliminarão essas tensões, mas a resistência ao desgaste será reduzida também. Então toda esta concepção precisa ser muito bem avaliada para que o problema não seja simplesmente transferido para outro tipo de defeito. Esse processo pode ser aplicado, mas em função de custos e movimentação de itens, é preferível trabalhar com base em uma geometria da peça e sistema de enchimento que poderão influenciar na composição dos elementos químicos, evitando retrabalhos posteriores como a normalização do material.

Conforme Bento et al. (2007), a tensão para fins de cálculo é dada em N/m², denominada Pascal (Pa). Para conhecer a resistência dos materiais é preciso saber como é o comportamento do mesmo quando submetido a carregamentos ou esforços aplicados ao componente em estudo. Para obtenção desses dados e resultados é preciso a realização de um ensaio de tração a partir de um corpo de

prova padrão para tal análise. Em muitos casos as empresas atualmente consideram mais o resultado do ensaio de tração do que a composição química do material, pois o ensaio de tração assemelha-se mais à aplicação do material no equipamento montado. Como toda construção é definida a partir de ensaios e análises de laboratório, esse é o fator principal da definição da otimização do projeto, ou seja, quando definido o tipo de perfil da peça, já ter certeza de sua capacidade de cumprir o esperado no que diz respeito à resistência em sua utilização.

Conforme Beer et al. (1996), as estruturas ou componentes são projetados para sofrer pequenas deformações elásticas respeitando a condição que o diagrama de tensões e deformações impõe a uma condição ideal de aplicação. A relação apresentada pelo diagrama toma como base a Lei de Hooke que refere-se ao módulo de elasticidade do material ou módulo de Young.

Segundo Arrivabene (1994), os critérios de resistência de esforços oferecidos pelos materiais são de suma importância na definição do perfil do item em questão, sempre observando sua aplicação, esforços externos e internos a que será submetido e suportado pelo coeficiente de segurança padrão a ser aplicado ao cálculo.

De acordo com Chiaverini (1986), depois de conhecidas as tensões que por sua vez também podem ser identificadas atualmente através de software de simulação numérica, o projetista ao definir o projeto, lança mão do fator chamado coeficiente de segurança. Esse coeficiente é um fator empírico pelo qual a resistência do material é dividida de modo a obter uma tensão conservadora, que por sua vez é chamado de tensão admissível de trabalho. A tensão de trabalho de uma estrutura, máquina ou componente, deve ser menor que a resistência do material, como forma de garantir a eficácia do item. O software de simulação tem sua importância na identificação de alguma necessidade de ajuste, seja de processo bem como do perfil da peça. Processo refere-se à temperatura de vazamento, tempo de resfriamento e demais variáveis da fundição que de alguma forma afetam os resultados do comportamento do componente.

2.1.1 Ligas ferrosas

Segundo Kessler (2009), as ligas ferrosas são classificadas em aços e ferros fundidos em suas devidas classes que podem ser cinzentos (GG15 a GG30) e nodulares (GGG40 a GGG70), referência utilizada pela maioria dos fabricantes. Essas classes obedecem composições químicas definidas em normas internacionais que regulam sua estrutura onde podemos citar a norma DIN e ABNT. Os aços e ferros fundidos comuns são basicamente ligas constituídas pelos elementos como: ferro, carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Quando são incluídos, voluntariamente em teores compatíveis à necessidade ou exigência, outros elementos ou algum desses em teores mais elevados, a fim de melhorar características físico-químicas ou mecânicas, têm-se aços e ferros fundidos ligados, adequados à especificação do produto final. Uma interferência que pode ser trabalhada e alterada dentro de uma margem específica aumentando ou diminuindo seus teores, mas que acaba definindo uma característica específica em cada fundição.

De acordo com Kessler (2009), são três os principais tipos de ferros fundidos: cinzento, nodular e branco. Os principais elementos estruturais de suas composições são:

Grafita: É uma forma pela qual o carbono se apresenta na estrutura do material fundido, de acordo com a Figura 2, sendo que esta pode apresentar-se sob as formas lamelar ou esferoidal conforme seu teor na composição. A grafita pode variar não só na quantidade, como também no tamanho e distribuição na formação estrutural do componente. Esses tipos de grafita existem nos ferros fundidos cinzento e nodular e inexistem nos ferros fundidos brancos, que apresentam por sua vez uma estrutura totalmente diferenciada, seja em relação à resistência, coloração e cheiro.

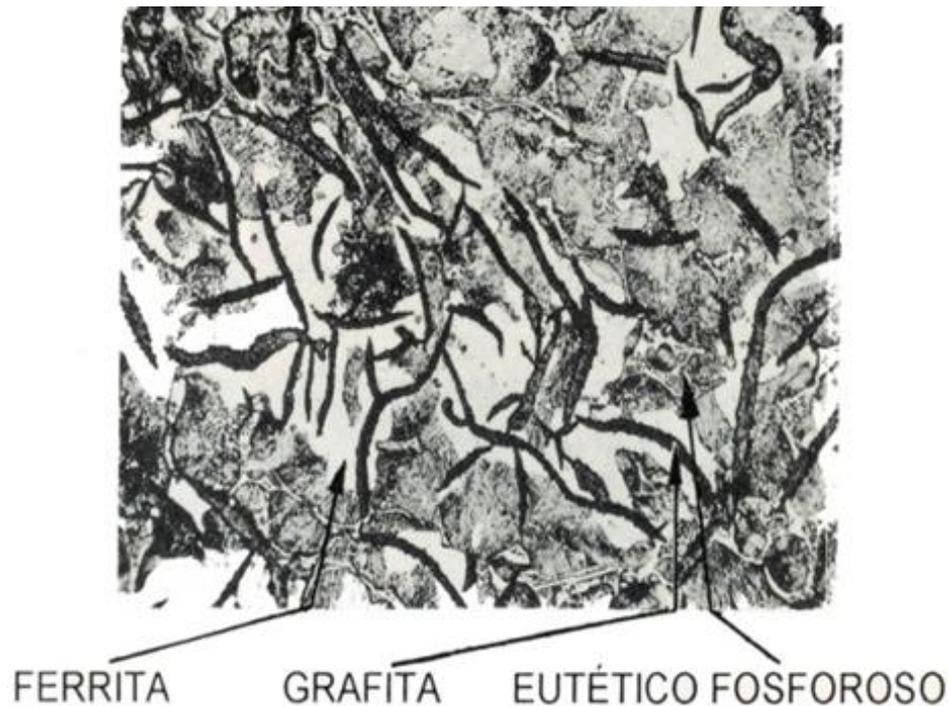


Figura 2 – Ilustração microscópica da grafita

Fonte: Kessler (2009).

Ferrita: A ferrita, conforme Figura 2, é basicamente o ferro puro, com baixa dureza (80 HB) e ótima usinabilidade. Não suporta grandes esforços, sejam eles de cisalhamento, compressão ou desgaste. Sua principal aplicação se dá em componentes de utensílio doméstico (panelas), ornamentação (ponteiras de grade) e ou peças sem esforço no conjunto de aplicação (polias de baixa rotação). Aplicação em itens de pouca responsabilidade e ou exposição a esforços e desgastes.

Cementita: de acordo com a Figura 3, é o carboneto de ferro que contém 6,7 % de carbono e que forma o ferro fundido branco, isto é, um composto de ferro e carbono, com alta dureza (até 700 HB) e muito quebradiço. A aplicação deste material em sistemas de plantio dá-se principalmente em ponteiras de sulcadores para deposição de sementes e fertilizantes no solo, ou qualquer outro componente que precise de alta resistência a abrasão. Pode ser utilizado em componentes que não sofram impacto, mas que necessitem de resistência ao esforço de desgaste. Sua presença é indesejável nos ferros fundidos cinzentos e nodulares, mesmo em pequenas quantidades, em função da contaminação da carga base, distorcendo a estrutura necessária para composição dos demais fundidos e alto custo na correção

da carga. Normalmente, a carga de ferro branco é produzida fora da programação normal da fábrica, ou seja, segrega-se todo esse material e a produção é feita em dia específico para que não haja nenhuma possibilidade de troca de matérias, tais como, derrame de material, respingos, retorno de canais e demais resíduos que possam alterar cargas de fundido nodular ou cinzento.

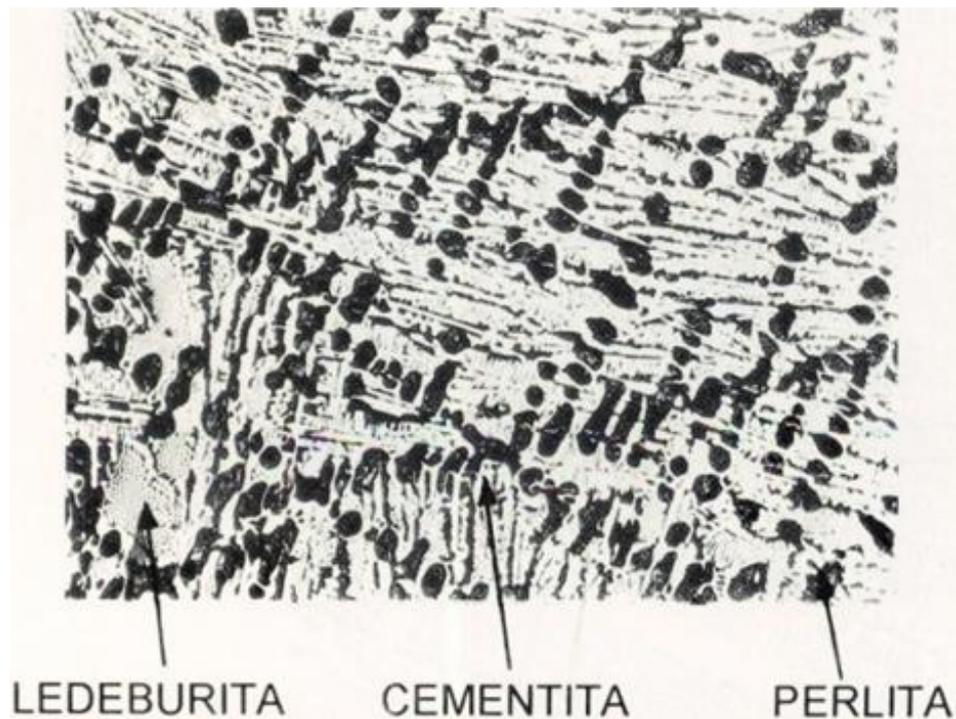


Figura 3 – Ilustração da cementita

Fonte: Kessler (2009).

Perlita: É um constituinte muito comum nos ferros fundidos cinzentos e nodulares dando a eles maior capacidade de resistência.

2.1.2 Elementos estruturais do ferro fundido

Na Figura 4, podemos identificar a representação da forma estrutural do ferro fundido cinzento em função de sua composição química, formado pela grafita lamelar.



Figura 4 – Grafita lamelar do ferro fundido cinzento

Fonte: Kessler (2009).

A estrutura cristalina é que representa e define o resultado da resistência ao esforço aplicado. Cinzento por sua vez mais frágil, contendo sua estrutura cristalina o formato de lamelas (vermes), ferro vermicular.

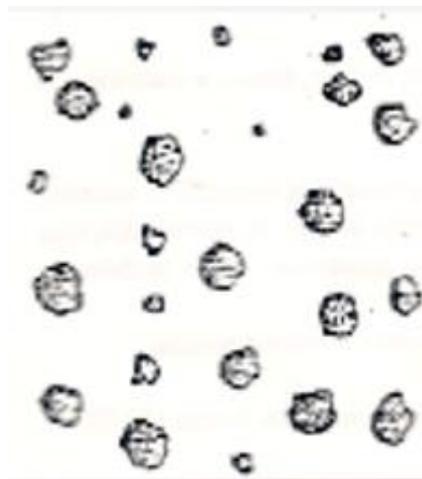


Figura 5 – Grafita esferoidal do ferro nodular

Fonte: Kessler (2009)

O ferro fundido nodular, com grafita esferoidal conforme Figura 5, apresenta maior resistência ao esforço de tração e compressão. Sua estrutura é com formato de nódulos, que aglomerados e em maior numero por mm^3 , garantem uma maior qualidade de acabamento e resistência do material.

2.1.3 Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos são comercialmente definidos como sendo ligas ferro-carbono-silício (Fe-C-Si), cuja característica dominante é apresentar carbono livre na forma de veios ou lamelas de grafita. Apresenta, de modo geral, fácil fusão e boa fluidez, boa usinabilidade, boa capacidade de amortecimento e ainda, características mecânicas adequadas ao uso, desde que em aplicações de baixo esforço em situações de alta tração, de acordo com Kessler (2009).

As principais aplicações do ferro fundido cinzento: base de máquinas pesadas, engrenagens, pequenos virabrequins, placas de embreagem, blocos de motor, pistões hidráulicos, barramentos de tornos, polias, hidrantes, tambor de freio, tampas, sapatas, etc., componentes onde não exige maleabilidade por conta do esforço aplicado.

Na Tabela 1 identificam-se os principais elementos químicos do ferro fundido cinzento, de acordo com Kessler (2009):

Tabela 1 – Composição do ferro fundido cinzento

Composição básica do ferro fundido cinzento (%)				
C	Si	Mn	P	S
3 a 4	1,20 a 3	0,3 a 1,2	0,125 máx.	0,12% Max.

Fonte: Kessler (2009).

De acordo com Chiaverini (1986), um fator que se deve considerar quando especifica ferro fundido cinzento, é o que relaciona as propriedades mecânicas com a seção das peças. Isso porque devido a quantidade fixa de C total e Si, a resistência diminui conforme aumenta a espessura da peça. Desta forma, a recomendação para máquinas que possuem grande esforço de seus componentes e em função do peso total, a indicação é que se utilize o ferro nodular.

Nas Figuras 6 e 7, seguem apresentações da estrutura do ferro fundido cinzento com ataque de ácido nital:

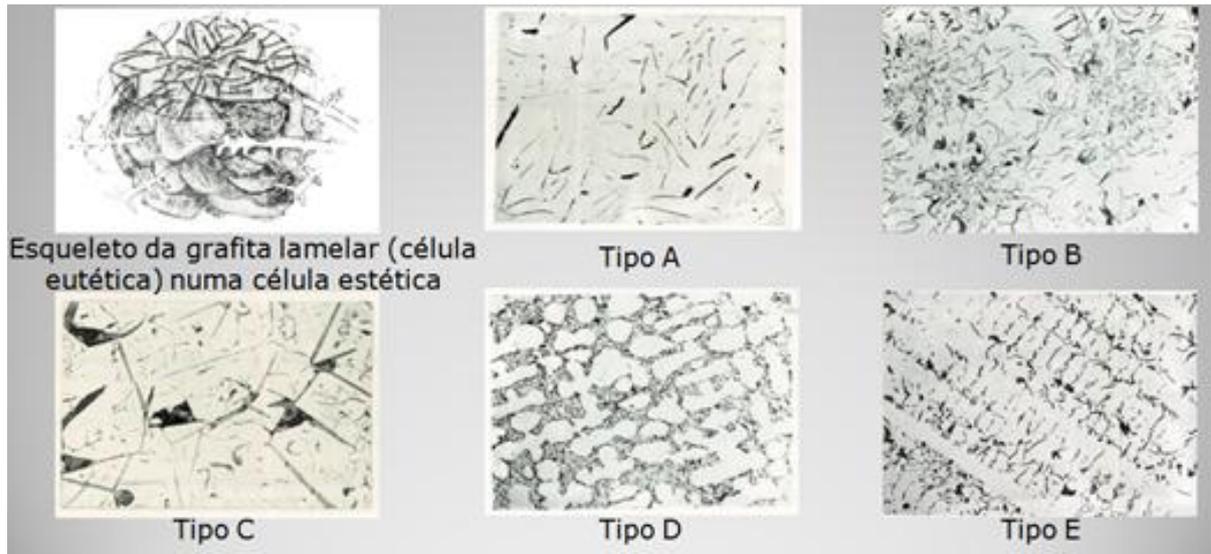


Figura 6 – Morfologia da grafita dos ferro fundidos cinzentos

Fonte: Kessler (2009).

Na Figura 6, está sendo representada a estrutura cristalina da grafita, a partir de uma análise metalográfica com ataque de ácido nítrico, que tem a função de auxiliar na visibilidade da estrutura do material. O ferro cinzento possui estrutura lamelar, em formato de vermes, que por sua característica possui menor resistência ao impacto. Conforme a intensidade de ferrita ou perlita formada em sua estrutura são classificados em tipo A, B, C, D e E possuindo maior resistência aos esforços respectivamente.

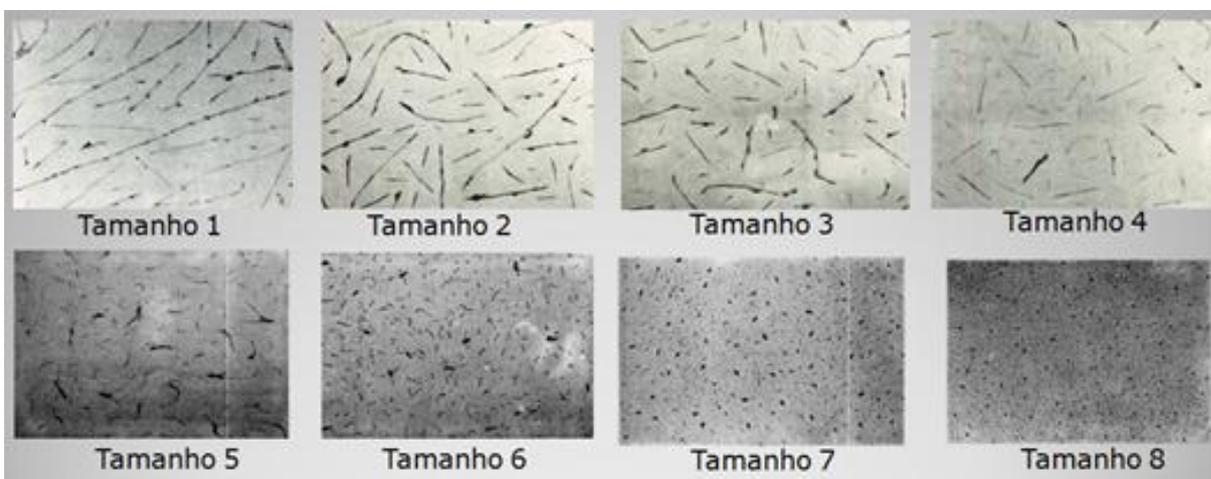


Figura 7 – Tamanho da grafita lamelar

Fonte: Kessler (2009).

Na Figura 7, está representado o tamanho da grafita lamelar do ferro cinzento, que varia do tamanho 1 que é maior até o tamanho 8 sendo o menor tamanho de grafita. Esta variação de tamanho ocorre em função da composição química e a variação no percentual dos elementos utilizados, respeitando os limites mínimos e máximos de percentual utilizado. A relação existente no caso entre o tamanho e o tipo de grafita, entende-se melhor comparando por exemplo que a grafita tipo D tem grafita, tem tamanho de 6 a 8 e sua estrutura é praticamente toda ferrita-perlítica.

Esta característica direciona a aplicação deste material principalmente na fabricação de matrizes e moldes em função do excelente acabamento superficial após usinagem. Nesta mesma condição pode-se identificar que a estrutura cristalina do fofo, esta passando para outra fase já em direção aos nodulares, pois a característica das lamelas está se assemelhando aos nódulos, característicos do fofo nodular.

2.1.4 Ferro fundido nodular

O ferro fundido esferoidal ou nodular Figura 10, é definido como sendo uma liga de ferro-carbono-silício-magnésio (Fe-C-Si-Mg), a qual apresenta a grafita em forma de nódulos resultantes da adição de magnésio no banho líquido de ferro fundido cinzento, que por sua característica apresenta propriedades estruturais aplicadas em peças de alto esforço. Apresenta fácil fusão, boa fluidez, boa usinabilidade e características mecânicas excelentes. Aplicações do ferro fundido nodular dão-se em: cubo de roda, virabrequins, engrenagem, braços de balancim, articulações de direção, caixas satélites, acoplamentos, pantógrafos, suporte de sulcadores, etc. peças onde se exige maleabilidade ou alta resistência, principalmente a tração de componente. No caso, o objeto de estudo desse trabalho também será em ferro nodular pela sua característica e necessidade de aplicação, bem como o resultado excelente de performance já identificado em outros experimentos, conforme Kessler (2009).

De acordo com Chiaverini (1986), o ferro fundido nodular também é conhecido como ferro fundido dúctil, e caracteriza-se pela alta resistência mecânica,

tenacidade e ductibilidade. O limite de escoamento é mais alto que nos ferros fundido cinzento e maleável, e mesmo que no aço-carbono sem elementos de liga. A grafita nesses materiais é esferoidal, que é mais favorável que a nodular propriamente dita do ferro maleável, afetando menos a continuidade da matriz do material.

Na Tabela 2 estão representados os elementos químicos da carga base do ferro fundido nodular, segundo Kessler (2009):

Tabela 2 – Composição dos elementos químicos do ferro fundido nodular

Composição química do ferro fundido nodular (%)					
C	Si	Mn	Mg	P	S
3,20 a 4	2 a 2,80	0,10 a 0,90	0,03 a 0,06	0,06%Max.	0,02%Max.

Fonte: Kessler (2009).

Na sequência das Figuras 8, 9 e 10 identificam-se as diferentes estruturas dos ferros fundido nodular em diferentes condições de estruturação, de acordo com a análise de micrografia (metalografia).

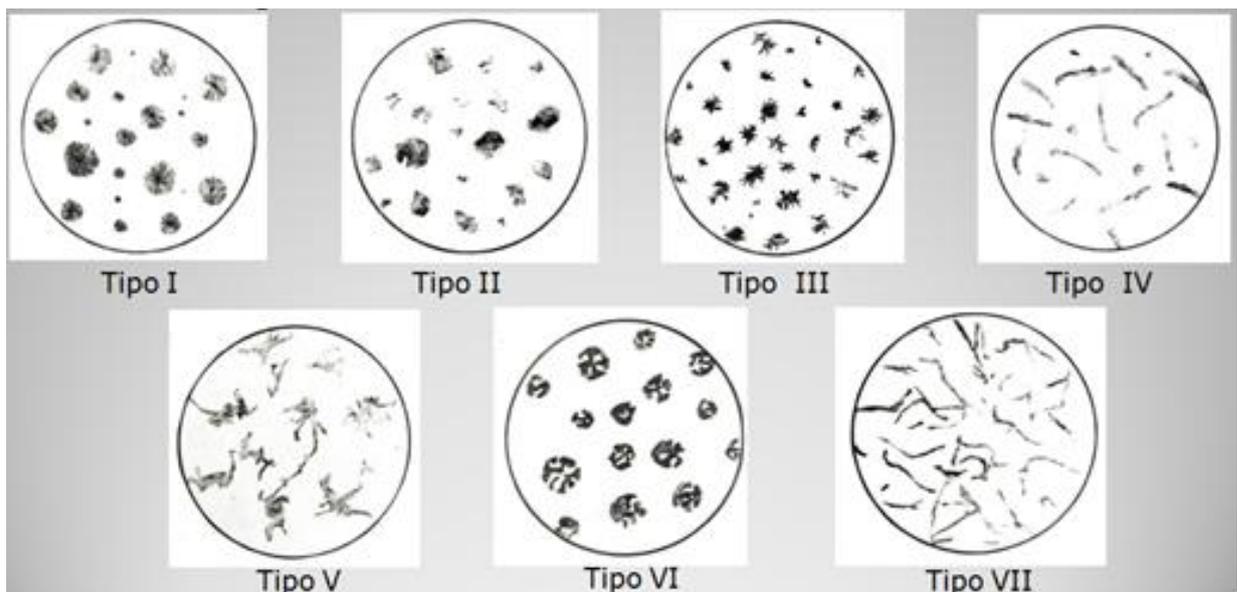


Figura 8 – Morfologia da grafita nos ferros fundido nodulares

Fonte: Kessler (2009).

De acordo com a Figura 8, a partir da análise metalográfica do ferro fundido, identifica-se o perfil da estrutura das classes em que esse se divide, que em ordem decrescente apresenta o teor de qualidade considerando aplicação com decrescente intensidade de esforço aplicado. A tipo I possui característica específica dos nodulares, identificados pela formação de nódulos em sua estrutura cristalina. De acordo com o aumento do tipo de fundido a estrutura apresenta perfil mais alongado, tendendo a formação de lamelas, específico dos cinzentos.

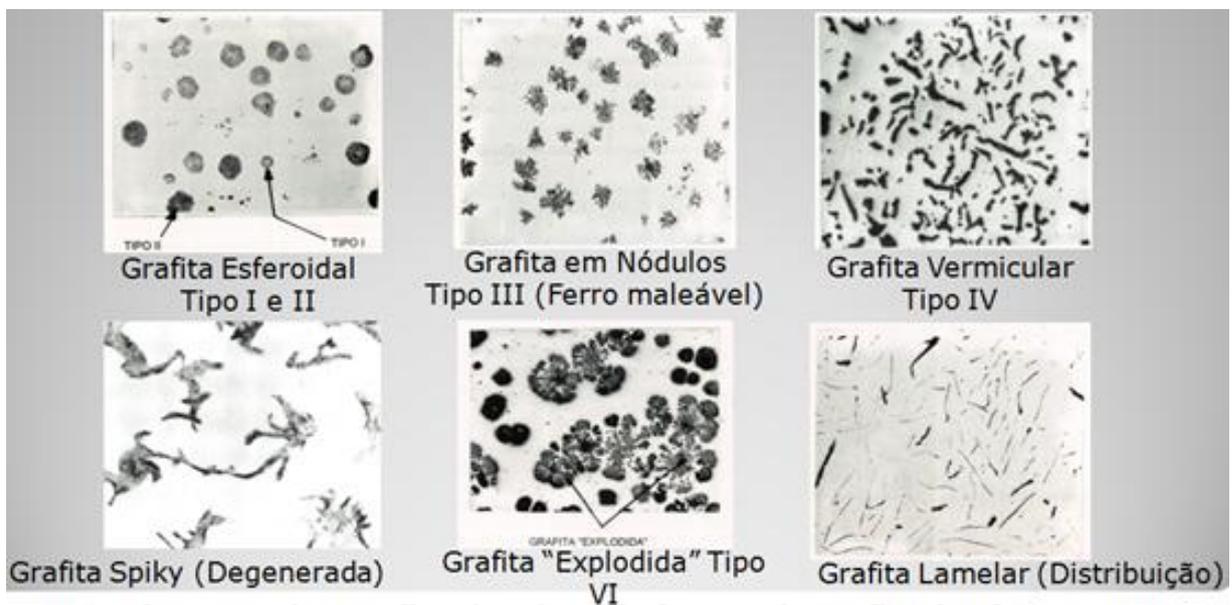


Figura 9 – Micrografia dos tipos de grafita dos ferros fundidos

Fonte: Kessler (2009).

Na Figura 9, encontra-se a representação metalográfica dos diferentes perfis de grafita, no formato esferoidal referente aos tipos I e II em formato de nódulos perfazendo o tipo III e a grafita explodida o que não caracteriza uma estrutura dentro da especificação da classe de material nodular.

No caso representado pela grafita explodida tipo VI, é característico da flotação de C onde afeta por sua vez toda condição ideal da estrutura do fundido, que seria de grande resistência a forças normais. Esta deformação estrutural tem influencia por conta da alteração do teor de C aplicado na carga, provocando tal desalinhamento e comprometendo a aplicação do item fundido. Da mesma forma

todas as demais classes possuem características específicas que irão determinar a sua condição de utilização.

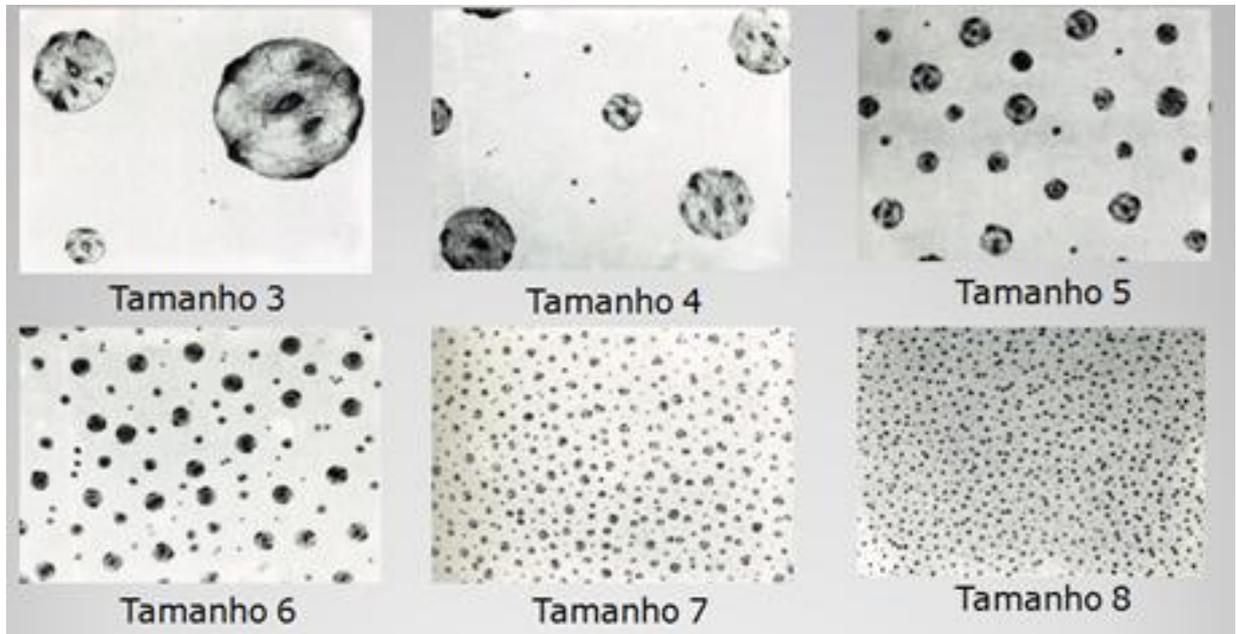


Figura 10 – Tamanhos da grafita esferoidal do ferro nodular

Fonte: Kessler (2009).

Já na Figura 10, identifica-se o formato e tamanho da grafita do nodular (nódulos), fator esse que influencia diretamente na microestrutura do metal, sendo que em maior quantidade por mm^3 oferecerá uma melhor resistência ao esforço solicitado. A quantidade de nódulos por mm^3 varia como identificado no tamanho 3 ao 8, condicionando a qualidade do ferro nodular. Esta condição é criada pela aplicação de elementos químicos utilizados na composição da carga sendo de maior ou menor intensidade dos elementos de liga que são o C, Si e Mn principalmente. O refinamento do ferro em função do aumento de nódulos é um fator importante pois a formação da estrutura cristalina, é mais eficaz e indicado a aplicação de esforços maiores, pois o espaçamento entre os átomos é menor.

Ainda conforme Kessler (2009), a influência dos elementos químicos nos Ferro Fundido Nodular são as seguintes:

Carbono: Constitui o potencial de nucleação da grafita, quanto mais elevado for o teor do carbono tanto maior o número de germes de grafita que irão se formar após o resfriamento do material. Deve-se evitar teores superiores a 3,6% de carbono para peças espessas de 4,0% para peças finas que provocariam uma flotação desse carbono na superfície da peça. A flotação por sua vez pode ser identificada por bolhas formadas normalmente na superfície superior da peça, com formato esferoidal e sua característica é de peça polida na sua parte interna, aparência de esfera perfeita. A espessura da peça, tem uma grande influência na resistência do material e até no processo de fundição que pode apresentar grandes dificuldades em relação à qualidade do item. Por outro lado o crescimento do teor de carbono não tem grande influência na resistência mecânica, aumenta a fluidez dificulta a formação de rechupes, ou seja, falhas na peça em função da contração excessiva do fundido durante o resfriamento.

Silício: O silício é um elemento que promove a formação de grafita, auxilia a nucleação e promove uma estrutura livre de carbonetos, pontos que, caso se formarem na estrutura, podem fragilizar a peça. O limite máximo (2,80%) deve ser observado para evitar a redução na resistência ao impacto do material. Deve se atentar aos limites do carbono equivalente ($C_{eq} = \%C + 1/3 \% Si$) que não deve ultrapassar de 4,36% em peças espessas e de 4,55% em peças finas o que também provocaria a flotação de grafita. O Si tem uma importância muito grande na melhora da fluidez do metal líquido na formação da peça.

Fósforo: Teores acima de 0,07% fragilizam o material, principalmente à baixa temperatura. Outro fator é a contaminação que o P exerce sobre as cargas, apresentando grandes dificuldades em sua correção e eliminação. Sua utilização gera risco alto de contaminação do retorno de canais utilizados em demais cargas de outros materiais.

Magnésio: Elemento indispensável para formação de grafita em forma de nódulos, que por sua vez agregam resistência à estrutura do fundido, mas que deve manter-se com teores de 0,03 a 0,06%.

Manganês: No ferro fundido cinzento, o manganês serve para neutralizar os efeitos de enxofre, o que não acontece para o ferro nodular que apresenta baixos teores de enxofre. Na prática, teores de manganês acima de 0,2% promovem a formação de

perlita que é especificada para determinadas classes de Ferro Fundido Nodular, que normalmente, segundo norma DIN, variam de GGG40 a GGG70 podendo ser ligado ou não.

Enxofre: O enxofre fixa uma certa proporção de magnésio para formar sulfetos (MgS). Resulta que o teor de enxofre no ferro base deve ser mínimo para evitar o consumo do elevado de liga nodularizante que é um composto de Ferro, Silício e Magnésio e a formação de escórias resultantes de reação. O teor de enxofre no ferro base (bica) não deve ultrapassar a 0,02%, podendo desestabilizar a composição da carga e, por sua vez, a estrutura do fundido.

Cobre: Promove a formação de perlita, é utilizado em percentagens de 0,5 a 0,8%, para aumentar a dureza e a resistência do material, aplicados teores dependendo da exigência ao item a ser fundido.

Estanho: Produz o mesmo efeito do cobre, porém, em percentagens de até 0,1% (100gr para 100Kg de ferro). A opção de um ou outro pode ser definida pela oferta ou custo de aquisição.

Elementos nocivos: o ferro fundido nodular, não aceita em sua composição sem apresentar alterações, as percentagens limites abaixo:

- Chumbo – 0,005%
- Titânio – 0,02%
- Antimônio – 0,05%
- Alumínio – 0,01%
- Bismuto – 0,005%
- Enxofre – 0,02%

2.1.5 Nodularização do fundido

De acordo com Kessler (2009), o fundido nodular deve ter os seguintes processos para formação da estrutura ideal que atenda o padrão de aplicação das peças nesse material:

Nodularização: a obtenção do ferro fundido nodular ocorre com adição de pequenas quantidades de magnésio normalmente na forma de ferro-silício-magnésio (Fe-Si-Mg), cerca de 2%, ao ferro ainda em estado líquido, na panela de vazamento, que por sua vez, antecede o vazamento do molde em areia. Com a adição do Si ocorre, então, uma forte reação, que ocasiona fervura com liberação de uma intensa luminosidade, provocando a formação da grafita esferoidal no fundido passando a ser nodular. Após adiciona-se imediatamente o agente inoculante Fe-Si, para produzir uma matriz de microestrutura adequada à especificação da composição exigida. Essa aplicação deve ser obrigatoriamente dentro da margem de variação dos teores para que não se perca a carga toda com excesso ou falta de nódulos na estrutura do material que caracteriza o nodular.

Inoculação: a inoculação atua no sentido de melhorar as propriedades mecânicas do material, informação evidenciada na Figura 11 onde se comparam duas situações de análise, evitando a formação de pontos duros (carbonetos) e de pontos moles (áreas de ferrita). A inoculação tem por principal ação homogeneizar os elementos para uniformidade da estrutura molecular. O inoculante de uso mais generalizado é o ferro-silício com 75-80% de silício na liga, adicionado em teores entre 0,2 – 0,6% na panela. Foram desenvolvidos inúmeros inoculantes em que outros elementos poderão ser utilizados juntos como FeSi, como o bário, estrôncio, cálcio ou terras raras (cério), mas em pequenas quantidades como garantia da eficácia no processo.

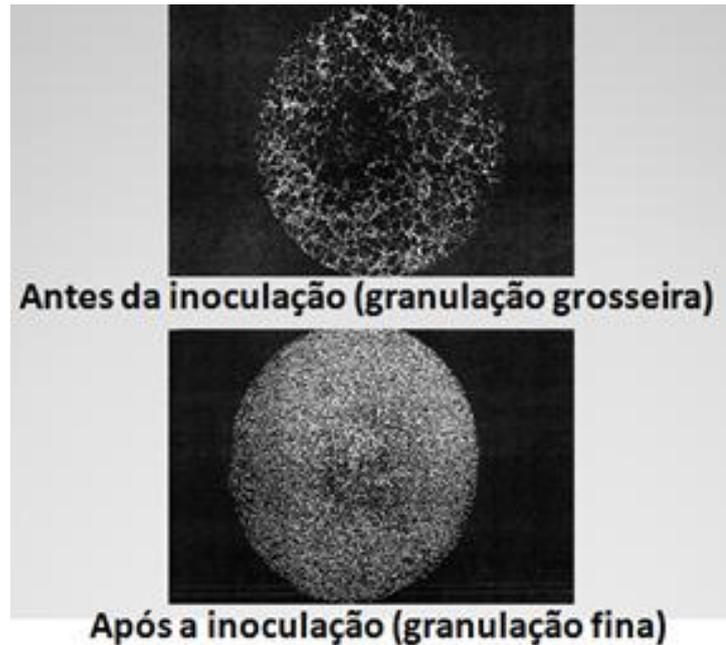


Figura 11 – Metalografia com e sem utilização de inoculante
Fonte: Kessler (2009).

A aplicação de Nital 4%, auxilia na verificação da estrutura molecular do material em análise, possibilitando uma identificação mais clara de sua estrutura auxiliando na análise de resultados com maior precisão.

Na Figura 11, pode-se verificar a importância de uma inoculação conforme padrão ou fora do padrão, ficando evidente a forma que a estrutura se apresenta. Na imagem no topo da Figura 11, a análise sem utilização do inoculante a estrutura está sendo vista com formação mais grosseira, já na imagem inferior da Figura 11, a aplicação de inoculante propicia uma melhor performance do metal na peça analisada, formando tamanhos diferentes das células eutéticas.

2.2 Simulações através de cálculo numérico das tensões dos materiais

Atualmente já existem inúmeros softwares que auxiliam em uma análise através de simulações para identificar com antecipação possíveis pontos de “stresse” dos materiais, evidenciando através de imagens ou gráficos as possibilidades de comportamento que cada peça poderá desenvolver de acordo com

sua aplicação em campo ou no conjunto de sua composição de trabalho. Essa informação é muito importante em função da previsão antecipada dos resultados, o que reduz custo de produção e menor risco de erro na aplicação do componente na máquina em projeto.

Segundo Olive e Egner-Walter (2012), geralmente grandes áreas de superfícies complexas de peças fundidas, com determinados requisitos dimensionais e favorecimento de pontos com tensões no material, são muito exigentes sobre a formação do seu perfil ideal para produção em fundido e atendimento à necessidade de aplicação e desempenho. Nos pontos de maior tensão, a distorção coloca grandes exigências no processo para que se garanta a eficácia em relação à especificação de sua aplicação.

Certas partes que são particularmente propensas a pontos quentes, necessitam de algum tratamento ou ação no sistema para reduzi-las, aumenta o custo de produção, que pode também levar à distorção do componente.

Devido aos numerosos parâmetros, a simulação do processo completo de produção, apresenta-se como uma ferramenta poderosa no que se refere a dados precisos e informações relevantes que podem ser identificadas antes da produção da peça, possibilitando uma ação antecipada a um possível problema. Com isso, inúmeras empresas estão investindo em softwares de simulação que antecedem a informação daquilo que ocorrerá na peça, evitando dessa forma, desperdícios e retrabalhos, até possíveis recall. A verificação de falhas na peça fundida, por muitas vezes só é identificada através de porosidades externas ou verificadas no processo de usinagem e corte da peça. Esses processos muitas vezes mesmo sendo intensos, não revelam as falhas por estarem em profundidades maiores ou pontos específicos que não sofrem estas interferências.

Esse fator poderá gerar uma fragilidade oculta da peça que o software de simulação numérica irá evidenciar durante a simulação e corrigido a tempo aplicando técnicas de cálculo ou reprojeto da peça, adequando para que o resultado seja melhorado e efetive a qualidade do componente.

De acordo com Bartels et al. (2000), se um material transita em canais estreitos e sem raios de concordância dentro do molde, independente de sua característica seja rígido ou flexível, pode provocar altas tensões que são induzidas por esse método, carregando consideravelmente a estrutura do material com esforços irregulares provocando pontos de fragilidade por destinar esforços para

pontos não importantes do componente. Se há poucas alternativas para mudança em relação ao peso ou geometria em um componente, a única opção é tentar ajustar seu material ou sistema de alimentação, “amarrando” o sistema todo de forma que auxilie na otimização do vazamento, para que as tensões sejam diminuídas ou ao menos contidas durante o resfriamento da peça. Essa otimização também pode ser beneficiada com regulação de temperatura, tempo e velocidade de vazamento, bem como o tempo de resfriamento da peça dentro do molde. A análise avalia cada caso depois de uma simulação e verificação dos pontos de maior tensão sobre a superfície do componente. Esse embasamento sustenta o foco desse trabalho, que no caso, busca identificar o que a distribuição de peças dentro de um molde compromete ou influencia na construção da peça fundida. Identificar por sua vez as variáveis de processo ou layout do ferramental, interfere na peça final naquilo que se relaciona a tensões do material.

Conforme Bartels et al. (2000) a movimentação das grafitas esferoidais de forma interativa entre a formação de nós cujos valores de tensão estão acima de um valor limite predeterminado, são direcionadas para o exterior da peça semelhante ao que surgem nos processos de crescimento natural da grafita harmonicamente com efeito livre das transições e constante, para todos os pontos de tensões superficiais na peça. Devido às despesas relativamente elevadas na realização de testes para ajuste do processo, a simulação numérica no ambiente CAD continua a ser a aplicação mais recomendada, pois evita inúmeros retrabalhos, perda de material e esforços direcionados para pontos errôneos. A verificação de comportamentos e resultados na simulação numérica para ferro fundido, viabiliza a aplicação de inúmeros projetos em estudo e testes simultaneamente, pois toda a perda que ocorreria na prática, é delimitada e ajustada durante a simulação, auxiliando na redução de custos e aumentando com isso o índice de acertos dos resultados.

Segundo Olive e Egner-Walter (2012), a solidificação e arrefecimento temperatura ambiente de todos os fundidos, ocorre com uma heterogênea e inerente distribuição de temperatura. Quanto às áreas que possuem resfriamento mais rápido, como as partes mais finas, a contração térmica é limitada, nesse momento é que as tensões de tração são formadas. Em altas temperaturas, onde o estresse de rendimento é mais baixo, as tensões térmicas são aliviadas por algum grau de deformação plástica que a peça sofre em função de sua geometria que favorece tal comportamento. As maiores tensões e deformações plásticas ocorrem quando a

temperatura é diferente entre as áreas com taxa de arrefecimento mais rápidas e mais lentas quando estão em um grau máximo admissível. Com a aplicação de um produto (resfriador metálico) para refrigeração, a diferença de temperatura entre as duas áreas diminui. Para este procedimento aplicam-se resfriadores que aceleram o resfriamento da peça em pontos específicos, auxiliando na melhor distribuição da temperatura e reduzindo os pontos de stress da peça em função de suas variáveis de interferência. Esse inicialmente leva a aliviar o estresse, redução nível de tensão de tração e, em seguida, há uma mudança no estado de tensão de tração que ocorre na peça, para compressão nas partes mais finas, provocando mais rapidamente o arrefecimento da mesma. No arrefecimento lento das partes mais grossas da peça, acontecem as tensões menores de tração. Esse stress da transição, deve-se por conta da deformação plástica em altas temperaturas.

Depois de completar o arrefecimento até à temperatura ambiente, pontos residuais de compressão e tensões surgem nas áreas finas da peça, ao passo que a tração residual de tensões surge no ponto mais grosso.

As tensões residuais de fundição podem afetar processos subsequentes como cortes, alisamento, tratamento térmico e usinagem. As tensões residuais podem ser redistribuídos durante o recorte e usinagem, mas adicional de tração e tensões de compressão podem ser introduzidos na fundição por tratamento térmico, conhecido como alívio de tensões do material, segundo Olive e Egner-Walter (2012).

Na Figura 12 pode-se verificar uma ilustração identificando pontos de maior tensão que a simulação a partir do software de cálculo numérico identifica, como resultado em suas simulações. De acordo com a escala à direita da imagem da simulação, evidencia-se a variação das tensões residuais encontradas a partir da simulação.

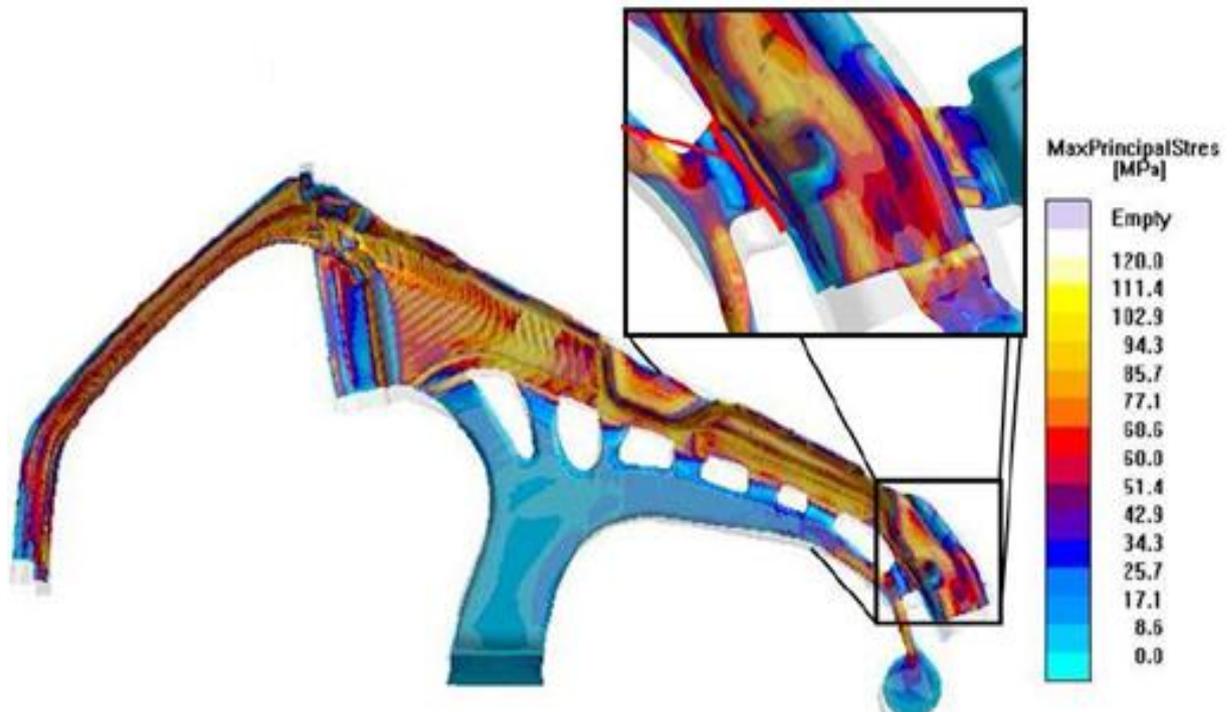


Figura 12 – Escala da máxima tensão residual simulada

Fonte: Olive e Egner-Walter (2012).

Através da simulação numérica, podemos identificar várias situações para que se conclua a análise de resultados do comportamento que a peça fundida terá no molde durante a fundição e posteriormente no resfriamento, levando em conta a temperatura de vazamento, resfriamento, tempo de resfriamento, contração, pontos quentes, etc. Podemos identificar através de simulações detalhes representados na Figura 13, onde fica clara a aplicação de diferentes sistemas de alimentação da peça que influenciam diretamente no desempenho do material, segundo Bilharz, (2013).

De acordo com Mendes (2009), a simulação numérica consiste num processo de projetar um modelo computacional de um determinado sistema real e conduzir experimentos com esse modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação, ajustando virtualmente o que precisa ser alterado com base na teoria ou técnicas dominadas dentro do processo.

De acordo com Oliveira et al. (2009), existem várias ferramentas para simulação numérica do processo de fundição especificamente de acordo com esse trabalho, em fundição por gravidade, disponíveis no mercado, algumas mais outras menos abrangentes, permitem a previsão dos fenômenos associados ao enchimento

das cavidades e à solidificação. Tendo esta previsão de comportamento, é possível traçar um plano de ação imediato atacando a causa raiz do problema apresentado no resultado da simulação. Para os resultados relativos ao enchimento das cavidades do molde cita-se, por exemplo, a previsão do caminho do fluxo metálico, o seu perfil de temperatura, de velocidade e pressão, onde deverão ser considerados dados na simulação idênticos aos apresentados ao software, para garantir a fidelidade de resultados. Para os resultados associados à solidificação, destaca-se o perfil de solidificação propriamente dito, previsão de regiões propensas à incidência de porosidade, previsão de microestrutura final, propriedades mecânicas e tensões residuais do material, que no caso desse projeto é o foco do estudo.

Ainda de acordo com Oliveira et al. (2009), ao se utilizar um programa de simulação numérica para fundição, deve-se conhecer muito bem o processo real que está sendo simulado e possuir um método de garantia da sequência do passo a passo fielmente ao planejado para o software, as características particulares do processo em questão e se possível, conhecer o comportamento de todos, ou do maior número possível de equipamentos que compõe a linha de produção, na qual o componente simulado é ou será produzido, garantindo a fidelidade entre o resultado do simulado com o que ocorre na prática. Características como o tipo de processo de moldagem, a rigidez e compactação do molde, o tipo e composição da areia utilizada na confecção de moldes e machos, tempo de desmoldagem disponível para a linha de produção, características do metal de base (forno cubilô, a arco, indução), composição química, tratamentos de nodularização e inoculação, forma do vazamento (manual ou automático), são algumas variáveis que podem alterar completamente as características do fundido e por consequência influenciar diretamente na qualidade dos resultados de simulação, se não forem considerados exatamente com suas particularidades de produção. Cabe ao gestor de engenharia e seus pares envolvidos no processo de simulação, avaliar tanto a qualidade e fidelidade dos dados de entrada e condições de contorno que alimentam o software, quanto a qualidade dos resultados finais da simulação.

Quanto melhor a produção real da peça puder ser representada no estudo computacional, mais próximos os resultados da simulação estarão da realidade, caso contrário a simulação será tratada de uma forma e o resultado diferente, gerando dúvidas e descrença no processo de simulação por conta da variação de resultados.

Conforme Afonso (2009), As ferramentas de simulação utilizadas no processo de fundição vêm cumprindo um grande papel no desenvolvimento de fundidos, auxiliando projetistas e fundidores de uma forma simples e direta, desde a concepção do produto até a sua produção final. O estudo da situação favorece um ganho não somente financeiro, mas de tempo e menor movimentação na fábrica, seja de ferramentais, peças de amostra ou documentos, pois o estudo da simulação numérica favorece um melhor planejamento e redução de perdas. Pode-se garantir a fundibilidade de um componente durante a sua criação, definir o sistema de canais de distribuição e ataque, além de alinhar dados de processo, tudo isso sem vaziar uma só gota de metal, evitando desperdício por possível equívoco de projeto e garantindo a produção com maior precisão.

De acordo com Bilharz (2013), na ilustração do comportamento do ferro fundido durante seu resfriamento no molde demonstrando os pontos quentes através da escala de temperaturas, principais causadores de tensão na peça. Entre a Figura 13 e Figura 14, pode-se verificar as diferenças entre as representações de uma clara alteração na distribuição mais uniforme da temperatura e variação do tempo de resfriamento. A alteração do sistema de alimentação ocasiona um fluxo diferenciado no enchimento do molde e também o resfriamento da peça, em função do volume injetado e dissipação de calor na areia.

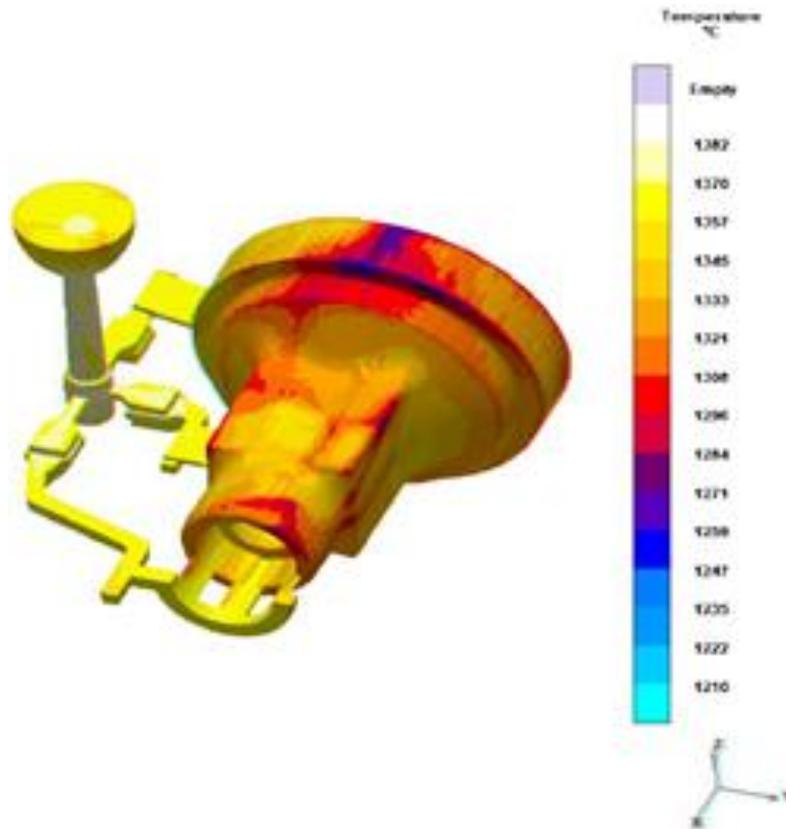


Figura 13 – Representação da distribuição de temperatura

Fonte: Jeremy Bilharz (2013).

Na Figura 13, é nítida a elevada temperatura do conjunto o que possivelmente ocorre por conta da maior quantidade de canais de ataque, que são os responsáveis por encher o molde de areia. Com isso o volume de metal é maior e dissipa seu calor para o entorno dificultando ou aumentando o tempo para resfriamento da peça.

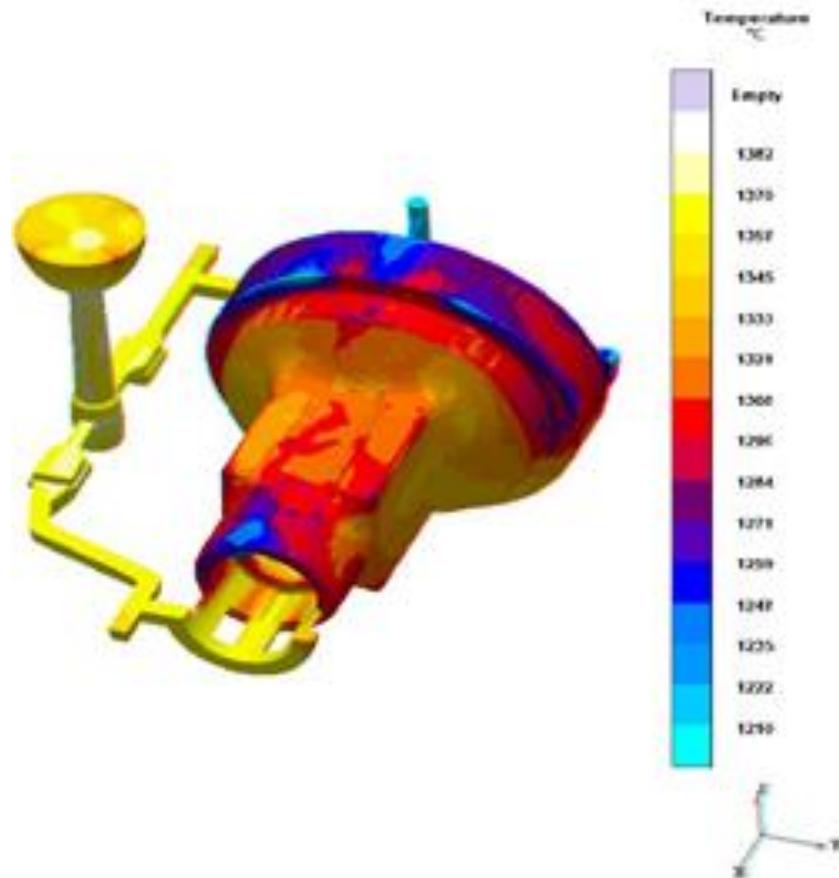


Figura 14 – Representação da distribuição de temperatura

Fonte: Jeremy Bilharz (2013).

De acordo com Bilharz (2013), na Figura 14 verifica-se a influência do sistema de alimentação com interferência na velocidade de enchimento do molde, mesmo tendo menor quantidade de canais de ataque. Esse detalhe, por sua vez, tem influência direta no comportamento do metal durante o resfriamento levando em conta a distribuição homogênea da temperatura, enchimento do modelo, redução do tempo de enchimento, etc. A variação da velocidade de enchimento e resfriamento pode influenciar na formação da estrutura do fundido que de acordo com o perfil e esforços a serem sofridos, poderá não atender a especificação de projeto.

Na Figura 14, está clara a condição de uma temperatura mais baixa, pois a alteração na quantidade de canal reduziu os pontos de ligação com a peça, menor volume de metal no molde e com isso uma temperatura mais baixa.

As Figuras 13 e 14, representam uma peça em processo de resfriamento na mesma condição, mas em função principalmente do volume de metal e sistema de

alimentação alterada, a variação de temperatura é evidente podendo desta forma interferir de alguma forma na estrutura do metal fundido.

De acordo com Walter et al. (2013), na Figura 15 pode-se verificar uma correlação da estrutura do fundido, levando em conta as imagens de microestrutura apresentadas anteriormente, de que na mesma peça em função da variação dos pontos quentes, ha diferentes formações de microestruturas no mesmo produto.

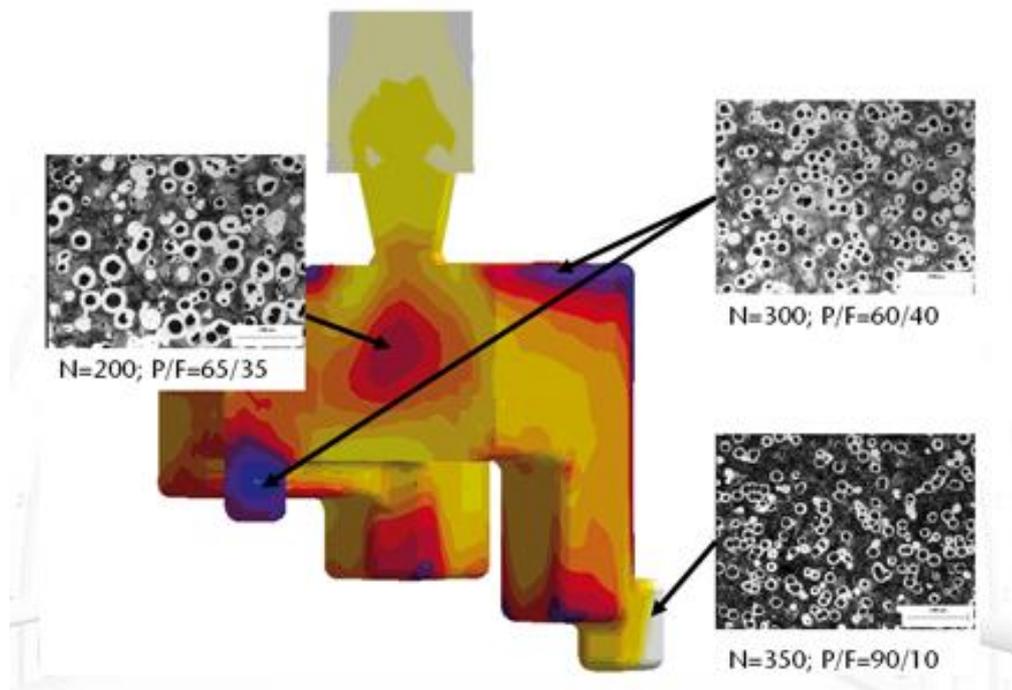


Figura 15 – Diferentes microestruturas em função da variação de temperatura

Fonte: Software de simulação numérica 2013-11-11.

Conforme Bartels et al. (2000), a criação e definição da parte funcional de um componente deve estar focado já no desenvolvimento em conjunto com o processo de fundição levando em conta inúmeras questões de extrema importância que o projetista deve considerar ao projetar e que são:

- O componente do conjunto vai resistir ao stress a que será submetido?
- Que tipos de esforços serão aplicados no componenete dentro do conjunto de aplicação no equipamento?
- A máquina estará sendo utilizada em quais condições de esforço (solos, arraste, peso (força) aplicados na estrutura)?

- Todos os pontos críticos encontrados e ou verificados estão sendo considerados?
- Os componentes em algumas áreas de grandes dimensões, que apresentam variações das tensões podem ser ajustados ou isso impactará em seu custo para fabricação (custo benefício da produção)?
- As deformações que ocorrem durante a operação estão dentro de uma margem tolerável de aceitação ?

Na Figura 15, fica evidente a diferença ocorrida na estrutura do fundido em função dos pontos quentes distribuídos uniformemente durante o resfriamento, sendo a contagem de nódulos e dureza com alta variação na peça.

Conforme Bartels et al. (2009), uma resposta a todas essas perguntas por si, só com experiência ou meios analíticos para analisar, já que em simples geometria é difícil ou mesmo impossível, deve contar com uma alternativa confiável que é o software de simulação numérica de resultados, seja de composição química, temperatura, resfriamento no molde, fatores que auxiliam na definição de uma qualidade ótima do material e na formação da estrutura. Portanto, não é só para obter componentes de maior complexidade, mas é uma ferramenta poderosa para a detecção dos requisitos funcionais. Por exemplo, carregar ou induzir alterações de perfil ou estrutura molecular pela variação da temperatura no componente. A deformação pode ser maior ou menor de acordo com a força a ser aplicada na sua utilização no equipamento final do projeto.

Conforme Shaha et al. (2009), a solidificação dos materiais é o fenômeno muito importante para garantir que se obtenha a estrutura desejada das propriedades dos materiais . O processo de solidificação todo consiste em três fases distintas: a nucleação, crescimento e invasão das moléculas do ferro fundido em resfriamento. No entanto , quando a temperatura é suficientemente baixa, em seguida, os grupos estão em condição estável e não alteram mais. Na fase inicial, esse processo ocorre lentamente e quando a temperatura crítica de arrefecimento é atingida, que estimula o crescimento muito rapidamente dos grãos. Na etapa final, o líquido solidifica e os nódulos não podem aumentar mais, pois sua estrutura está formada e o perfil não pode mais ser alterado nem sua microestrutura do metal. Fundição é um processo complexo e o mais importante na fabricação, já a fundição em areia é o processo mais conveniente em fundição por sua praticidade em moldar, vaziar e desmoldar, ainda que o molde fabricado possua matéria prima

reaproveitável e com capacidade de modelação em diferentes perfis de peças, variando somente seu volume. A maior parte do metal líquido pode ser vertida para dentro do molde de areia, em qualquer tamanho, obviamente já previsto anteriormente para completar toda necessidade exigida para conformação da peça.

Ainda conforme Shaha et al. (2009), atualmente a fundição em areia é muito popular para a fabricação de inúmeros produtos e componentes de engenharia.

O uso de software é um importante método para controlar a qualidade dos materiais e processo de grande interesse no presente estado da arte, que é reduzir o desperdício de materiais e economizar o custo do produto final, seja na composição química, como no desenvolvimento do produto onde o software de simulação numérica dá o suporte técnico ao mesmo.

A taxa de solidificação do metal fundido no molde de areia depende da condutividade térmica do material do molde, moldando desenho, a direção do fluxo de calor para dentro da parede do molde, etc. Se o fluxo de calor através do molde é muito rápido, a velocidade de solidificação será maior nesse ponto e vai afetar a microestrutura e propriedades dos materiais, podendo provocar deformações sejam físicas ou estruturais das peças. De acordo com Shaha (2009) apud Al - Asady et al. (2009), cita que a análise de elementos finitos (FEA) tornou-se uma ferramenta importantíssima para a solução de uma ampla gama de problemas de engenharia tanto de produto quanto de processos. Possibilitando desta forma em sua aplicação uma otimização de tempo e redução de custo, pois a análise a partir de uma simulação numérica, identificando-se na estrutura de um determinado conjunto, seus principais problemas em relação a esforços de tração e tensões dos materiais, bem como alinhamento de possíveis variáveis no processo de fabricação.

Ainda conforme Shaha (2009) apud Seetharamu et al. (2001) estudaram os fenômenos de solidificação em molde de areia para o stress térmico usando FEA e eles discutiram sobre o efeito de solidificação na formação de estresse no material.

Conforme Shaha et al. (2009), considerando-se os fluxos de calor dentro do molde de fundição interferem diretamente na taxa de arrefecimento do líquido, que por sua vez, afeta a estrutura e as propriedades dos materiais até a solidificação final da peça dentro do molde. Ao controlar a direção do fluxo de calor, é possível controlar as estruturas do fundido, bem como as propriedades dos materiais. Para prever o fluxo de calor através do molde de areia, de elementos finitos pode-se utilizar software de simulação numérica que auxilia de forma incondicional na

melhoria dos resultados de estudo e aplicação. A fim de verificar a simulação, para o ferro fundido cinzento, recomenda-se fundir a 1.350 °C de temperatura no molde de areia. Os resultados previstos e verificadas experimentalmente mostram que o calor máximo na junção do molde, linha de apartação, é o mínimo na extremidade do molde, que aumenta com o tempo na secção de maior espessura.

Como consequência, a velocidade de solidificação é maior na extremidade da parede do molde que é comparativamente inferior perto do centro do molde por conta do volume de metal disponível e obviamente de acordo com o perfil da peça. Ela também mostra que a microestrutura sofre mudança de dureza devido a diferentes fluxos de calor por meio do molde de areia, podendo gerar pontos de tensão na peça, seja pela circulação do metal com maior ou menor velocidade e ou temperatura, bem como pelo perfil da peça em si. Esse perfil pode interferir na microestrutura e formação de pontos com maior stresse, quando possuir massas mal distribuídas com extremos de espessuras, seja por erro de projeto ou necessidade na aplicação da peça no conjunto final.

Desta forma, podemos definir que são inúmeras as variáveis que um produto sofre até sua concepção, sejam de produção ou processo, mas todos são fatores que interfrem de alguma forma no produto final e isso precisa ser considerado.

Em função de sua aplicação no conjunto, o produto precisa atender essas demandas sempre na condição ideal de utilização. Por conta disso, o engenheiro que projetar a plantadeira, precisa do respaldo de algum procedimento, ensaio ou norma que auxilie na definição do perfil e sua estruturação, evitando surpresas na utilização, garantindo desta forma a sua finalidade naquilo que se planejava desde a criação.

2.3 Tensões e resistência dos solos

A importância de considerar a resistência oferecida pelos solos no projeto de máquinas e equipamentos é levada em conta no sentido de verificar se o resultado calculado não seja afetado por paradas de máquina ou mau desempenho da mesma, afetando produtividade e desempenho bem como a imagem do produto de

uma forma generalizada no quesito comercial, de acordo com Torres e Saraiva (1999).

Segundo Torres e Saraiva, apud Baver et al. (1973), o efeito do impedimento mecânico sobre a ação do equipamento de plantio ou próprio desenvolvimento radicular das plantas, é motivado pela resistência estrutural dos solos variando em sua composição de acordo com as regiões analisadas, também dependente das características pedológicas e das práticas de manejo a que o solo é submetido, seja aragem (já descartada de forma geral) ou utilização do PD. De acordo com a variação de cultivo ou manejo, o solo irá desenvolver uma estrutura particular e isso será considerado na aplicação do implemento bem como seu desempenho de forma geral. Não somente a estrutura do solo deve ser considerada na definição do elemento que fará interferência na preparação do mesmo, mas sim o tipo de manejo que é aplicado nos períodos de cultivo. A interferência da planta, inclusão de animais, frequência de chuvas, sistema de plantio, peso de máquinas, são fatores de grande importância analítica na definição do equipamento mais indicado para transformação e preparação dos solos sem danos ao equipamento. Num ambiente natural, as características dos minerais primários e secundários em interação com o clima se aglomeram alterando a estrutura física e que por sua vez, determinam o estado de agregação individual natural do solo denominada de “ped”, ou seja, agregados naturais separados dos agregados adjacentes por superfícies frágeis que compõem o solo.

A formação e estruturação específica dos solos, provem do resultado da agregação das partículas primárias, originando formas definidas de acordo com cada fator de interferência nesta formação estrutural. A estrutura refere-se ao arranjo das partículas e definido em termos de tipo, classe e grau de desenvolvimento, de acordo com Heinrichs (2010).

Ainda conforme Heinrichs (2010), quanto a forma, os solos são classificados por:

- laminar: as partículas estão arranjadas em torno de um plano horizontal. As unidades estruturais tem aspecto de lâminas, sendo a linha horizontal sempre maior que a vertical. Quanto a tipos definem-se por:
 - prismática: as partículas do solo estão arranjadas em torno de uma linha vertical dominante e que apresenta topos planos, nivelados e com contornos melhor definidos ;

- colunar: apresenta os topos arredondados, característico de solos salinos.

Os fatores que influenciam a estrutura na formação dos solos em geral, de acordo com Bastos (2009), são os solos residuais que encontram-se na rocha de origem estrutural e pela ação do tempo, em função de intervenção da água e dos ventos, provoca a remoção das partículas formando uma nova estrutura. Neste processo de modificação, também considera-se a lixiviação de produtos de intemperismo, que são um conjunto de fenômenos físicos e químicos que levam à degradação e enfraquecimento das rochas. O termo intemperismo é aplicado às alterações físicas e químicas a que estão sujeitas as rochas na superfície da Terra, porém estas alterações ocorrem sem deslocamento do material. A lixiviação também consiste em um processo físico de lavagem das rochas e solos pelas águas das fortes chuvas (enxurradas) decompondo as rochas e carregando os sedimentos para outras áreas, extraindo, dessa forma, nutrientes e tornando o solo mais pobre. Processo que sofrem as rochas e solos, ao serem lavados pelas águas das chuvas. A lavagem do solo pela chuva, que provoca carreamento de minerais solúveis, como fósforo, cálcio, nitrogênio, etc. Nem sempre se verifica penetração dos micronutrientes nas camadas imediatas do solo, pois a lixiviação é processo superficial, ocorrendo particularmente em solos despidos de cobertura vegetal, por ação das águas pluviais e fluviais, sendo considerada como fator empobrecedor do solo.

Os solos transportados tem uma função primordial na desestruturação dos solos em geral, pois serão os principais agentes de transporte de nutrientes e partículas de solos provocando modificações na região atuante. O ambiente de deposição dos solos transportados e o processo de sedimentação, também serão considerados na composição de novas estruturas de solos, em função destas interferências sofridas pelo solos em função da lixiviação, de acordo com Bastos (2009).

Conforme Amado et al. (2011), fatores importantes que influenciam na estrutura ou transformação das características físicas dos solos, é a declividade do solo na lavoura onde é aplicada a AP, influencia o volume e a velocidade de escoamento de água na superfície do terreno. Quanto maior a declividade, maior será a velocidade do escoamento, provocando uma menor infiltração e armazenamento de água no solo, conseqüentemente é maior o risco de erosão e de transporte de sedimentos e agroquímicos aplicados anteriormente no solo em

função de alguma necessidade em específico. Observa-se principalmente no RS, onde encontra-se uma região com elevada declividade, já as menores declividades foram observadas nas cotas mais altas de altitude (planalto) e nas mais baixas. Geralmente, no planalto encontram-se também as maiores profundidades de solo, fato que contribui para o armazenamento de água e desenvolvimento radicular das culturas. Além da composição estrutural dos solos, sistemas de manejo e declividade serão considerados na análise de resultados de testes de campo realizados na verificação do desempenho do implemento testado.

Os tipos de estrutura de solos, conforme Bastos (2009), classificam-se em pelo menos tipos principais:

- solos granulares: são aqueles com estrutura granular, sendo um exemplo a areia, de acordo com a Figura 16.



Figura 16 – Estrutura granular

Fonte: Bastos (2009)

Ainda na Figura 16, identificam-se dois tipos estruturais de solos arenosos, onde o solo fofo possui uma estrutura menos condensada que o solo compacto. Esta estrutura possui diferenças que afetarão a infiltração de água bem como alterações estruturais em função das interferências de fenômenos naturais e artificiais.

- siltes: refere-se aos solos que apresentam baixa ou nenhuma plasticidade e que exibe baixa resistência ao ar. Na Figura 17 encontra-se a representação da estrutura molecular dos solos argilosos denominados siltes. As propriedades dominantes de um determinado solo são devidas à partes constituídas pela fração silte, apresentando uma dificuldade de distinção entre este e a argila, pois as mesmas podem ser separadas pela plasticidade de sua estrutura, que no silte é praticamente zero. O silte é produzido pelo esmigalhamento mecânico das rochas,

ao contrário da erosão química que resulta nas argilas, onde a molécula tem formato de alvéolos. Este esmigalhamento mecânico pode ser devido a abrasão, erosão eólica, bem como pela erosão devido às águas, como nos leitos dos rios e córregos, conforme Bastos (2009).

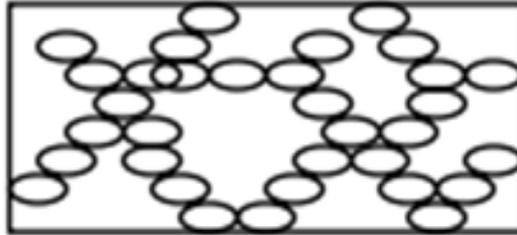


Figura 17 – Representação da estrutura alveolar do silte

Fonte: Bastos (2009)

- argilas: a argila é composta de partículas carregadas negativamente com cátions absorvidos, onde se tem duas partículas muito próximas em água, sendo uma de atração e outra de repulsão. Na Figura 18 pode-se identificar a forma como se comporta a estrutura da argila carregada negativamente.



Figura 18 – Partículas da argila carregadas negativamente

Fonte: Bastos (2009)

Ainda de acordo com Torres e Saraiva (1999), apud Kiehl (1979), o solo pode também não ter agregação natural em função das variáveis que o influenciam e ser denominado de “apedal”. Os agregados naturais individuais podem ser classificados de acordo com sua forma e arranjo estrutural, sendo os mais comuns a estrutura esferoidal (granular, grumosa), bloco (angulares e subangulares), prismática (prismática propriamente dito e colunares) e laminar, apresentando dessa forma diferentes conceitos em relação a sua formação e resistência em relação as ações submetidas. A estrutura esferoidal dos solos, com seus subtipos granular e

grumoso, é mais comum nas camadas superficiais do solo e dependentes da matéria orgânica ou sistema de adubação aplicado bem como seu manejo. O subtipo grumoso apresenta maior quantidade de micro-poros em relação ao granular, principalmente nos solos com altos teores de matéria orgânica o que auxilia na menor compactação dos solos auxiliando no seu manejo melhor otimizado.

Conforme Saxton e Rawis (2005), o estudo hidrológico analisa muitas vezes a infiltração de água no solo, condutividade, armazenamento e relações planta - água e sua atuação sobre a característica dos solos, auxiliando ou prejudicando sua composição e formação. Para definir os efeitos da água nos solos hidrológicos, estima-se uma característica da água do solo para o potencial de água e condutividade hidráulica que o mesmo possui, utilizando inúmeras variáveis do solo, tais como textura, disponibilidade da matéria orgânica (MO), e estrutura de formação, sistema radicular da planta cultivada e manejo. Pesquisa e testes de campo ou ensaios em laboratório são difíceis, caros, e muitas vezes impraticável para muitas análises hidrológicas, dificultando ou inviabilizando uma evolução mais rápida dos resultados. Estudos das correlações estatísticas entre a textura do solo , potencial de água no solo e condutividade hidráulica favorecem estimativas suficientemente precisas para muitas análises e decisões sobre este assunto. Desenvolver novos meios de inclusão de água no solo, equações características do banco de dados do solo, atualmente disponível nos Estados Unidos utilizando apenas as variáveis disponíveis de textura do solo.

Essas equações são semelhantes aos descritos na literatura por Saxton e Rawis (2005), mas incluir mais variáveis e área de aplicação é importante para agregar mais possibilidades de melhores resultados e possibilidades de adequação de futuros projetos, sejam de pesquisa bem como de equipamentos e máquinas que precisam formular seus projetos com base neste tipo de informação. Eles foram combinados com relações previamente relatados para tensões e condutividade e os efeitos da densidade, cascalho e salinidade para formar um sistema de previsão abrangente de características da água do solo para a gestão da água na agricultura de precisão e análises hidrológicas a serem efetuadas sequencialmente.

A partir dessas análises e colocações, podemos iniciar a identificação de inúmeras variáveis que influenciam na estrutura e resistência dos solos, tratando-se

de tensões seja por sua estrutura natural ou interferências mecânicas ou da própria natureza do mesmo.

Segundo Torres e Saraiva (1999) apud Kiehl (1979), os demais tipos de estrutura comentados aparecem nos horizontes inferiores. Os agregados do tipo prismático e em blocos, em condições naturais, são maiores do que os agregados do tipo esferoidal, podendo por isso, proporcionar menor quantidade de espaços vazios no solo sendo uma estrutura por consequência com maior grau de compactação e maior resistência à manipulação. Em condições naturais, a estabilidade e formação da estrutura do solo, quase sempre é elevada e depende do clima, da dinâmica da matéria orgânica, da textura do solo e dos fenômenos físicos e biológicos que interferem na floculação e cimentação dos seus agregados. Já no ambiente agrícola, a manutenção da estrutura do solo é um resultado dinâmico que, além do clima e da textura do solo, depende do manejo e das espécies cultivadas, os quais podem afetar, tanto os agregados naturais, como a formação dos agregados não naturais do solo. A utilização de plantas específicas com sistema radicular estendido, auxiliam na reestruturação dos solos, aumentando a granulação por conta de infiltração da água, auxiliando desta forma no manejo e produção. Esses na maioria das vezes, são resultantes da atividade física e/ou biológica proporcionadas pelas práticas de manejo, na orientação de espaços vazios no solo e, conseqüentemente, a relação entre macro e microporosidade a continuidade da macroporosidade.

Por muitas vezes, a aplicação de implementos agrícolas robustos na preparação dos solos nem sempre são a melhor indicação, e sim, seqüência de manejos adequados que possibilitem a menor interferência no mesmo e garantem uma estrutura boa de se trabalhar e ao mesmo tempo proporcione um desempenho ideal da planta com absorção de água e produtividade elevada. Assim, dependendo do manejo, o solo pode se tornar um ambiente favorável ou, então, apresentar a formação de camadas compactadas restritivas ao manejo, por exemplo, de sistema de alteração ou manejo, bem como desenvolvimento otimizado do plantio. Essa resistência que o solo poderá criar, cria impedimentos no desenvolvimento e produtividade das plantas bem como exigindo maior esforço dos equipamentos utilizados no plantio, principalmente em AP, por não haver uma preparação de solo, pois a aplicação do grão se faz de forma mais direta no solo.

O PD caracteriza-se pela quase ausência de preparo mecânico do solo e pela manutenção de cobertura superficial por resíduos vegetais apud (BERTOL et al., 1997), somente com uma interferência pontual na deposição do grão e fertilizantes de acordo com a necessidade evidenciada através de análise específica do solo. O objetivo principal é a manutenção da cobertura que tem sua importância destacada pela proteção ao solo da incidência do sol e da própria chuva, que de certa forma agride menos, pois esse solo apresenta uma permeabilidade maior e um sistema de contenção natural feito através da palhada disposta sobre o mesmo. Já no sistema de preparo convencional, a mobilização do solo é intensa e evidenciada com maior grau de prejuízo na terra e no ambiente que a circunda (plantas, rios) onde os resíduos vegetais são incorporados ao solo gerando, de certa forma, a matéria orgânica indispensável ao mesmo.

Assim poderemos destacar que, o plantio direto contribui para preservar as boas condições físicas e hídricas do solo, favorecendo desse modo, uma condição de maior produtividade, dispensando muitas vezes investimentos de preparo convencional agregando valor à agricultura e agilizando o processo que por sua vez ainda recebe suporte tecnológico no método de manejo e cultivo apud (BAYER e MIELNICZUK, 1997).

De acordo com French Food in US (2013) a AP, por sua força de expressão, é baseada em novas tecnologias (GPS, cálculo de rendimento instantâneo por colheitadeiras, divisão condicional de talhões, métodos de plantio otimizados), a fim de ajustar e regular os pesticidas, fertilizantes, insumos de água e solo de trabalho, com grande precisão. O objetivo é maximizar os agrônômicos, econômicos e ecológicos resultados na agricultura. O aprimoramento de ferramentas de análise e conselhos também fazem parte do processo.

Com essa análise sobre estrutura de solos, podemos entender que todo o processo é alinhado com base no detalhamento de cada componente estrutural, seja do solo ou na estrutura molecular de construção de um determinado componente do equipamento utilizado em AP. Um somatório de fatores que agregam tecnologia de fabricação e controle contribuindo para um resultado positivo e satisfatório de quem usufrui desses métodos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

3.1 Resultados e discussões

Nesse capítulo, é demonstrado todo o processo de análise e verificações do item do pantógrafo em estudo. Estarão sendo verificados os resultados de ensaios realizados através de simulação do processo da fundição com o software de cálculo numérico Magma, comparando o comportamento do metal com a utilização de dois leiautes propostos para aplicação na moldagem e vazamento do molde na fundição até a solidificação das peças fundidas e as variáveis que possam surgir no processo de fundição.

Serão evidenciados os leiautes A e B com distribuições diferenciadas das “figuras” na placa de moldagem, sendo a proposta A com 3 peças por molde, a proposta B com 2 peças por molde. Conseqüentemente haverá uma distribuição das peças e do sistema de alimentação diferenciada no molde, provocando uma alteração no volume de metal injetado bem como o caminho a ser percorrido na cavidade do molde.

Parâmetros como teor dos elementos químicos na carga, temperatura de vazamento, tempo de desmoldagem e resfriamento, serão utilizados nas mesmas proporções para as duas situações, leiaute A e B.

Estas condições serão comparadas a fim de verificar a variação na concentração de tensões residuais em função do processo de resfriamento e perfil do sistema de alimentação como um todo. Os dados encontrados pelo Magma serão o único parâmetro para verificação dos resultados e definição das ações se necessário.

3.1 Projeto do pantógrafo

Este projeto surge da necessidade de analisar a eficácia do pantógrafo utilizado na plantadeira de PD, levando em conta o perfil definido para o item em projeto e sua aplicação nos mais diferentes tipos de solos e situações de esforço.

Para evidenciar a importância desse estudo, é a demanda aproximada de 15000 unidades do pantógrafo ao ano, para montagem de semeadeiras Valtra, sendo uma das maiores fabricantes desse tipo de implemento aplicado em AP no Brasil.

Na Figura 19 verifica-se o suporte do pantógrafo e a posição de montagem no conjunto pantográfico da semeadeira. O perfil da peça em sua primeira versão e versão finalizada, é visto na sequência da apresentação de resultados dos ensaios realizados no trabalho de pesquisa.

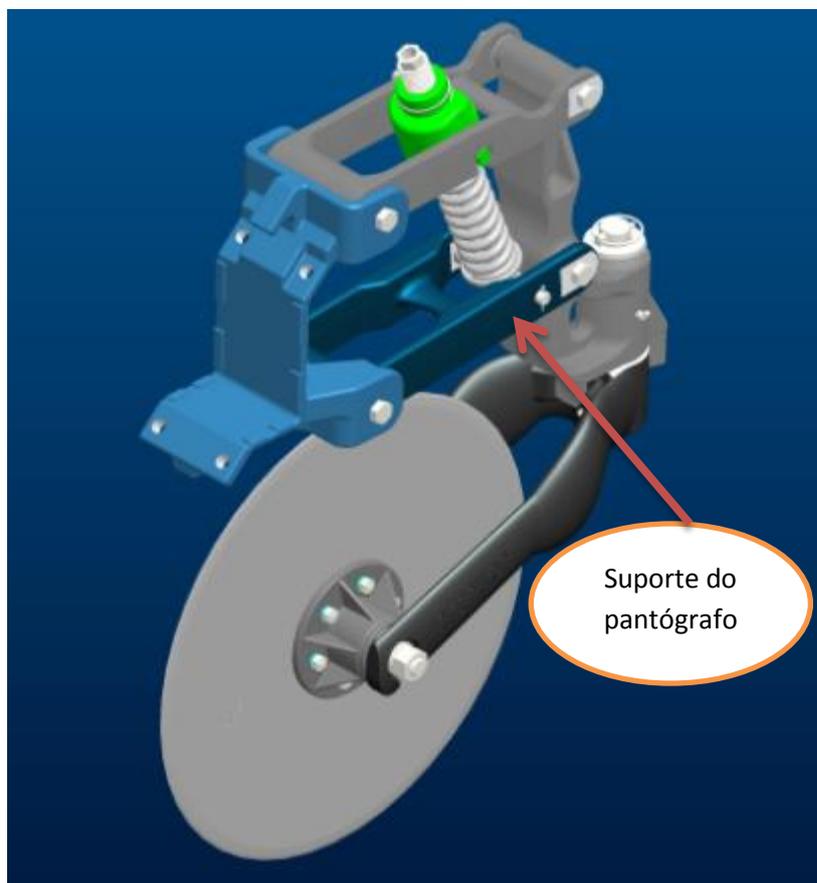


Figura 19 – Conjunto montado do pantógrafo

Fonte: Projeto Valtra (2013).

Na Figura 19 onde está o conjunto pantográfico e o suporte do pantógrafo, posicionada na região central do conjunto logo sobre o disco de corte, é o objeto de estudo que foi definido por ser a peça com maior esforço aplicado na utilização durante o plantio de grãos.

Linha da semente com sistema pantográfico é dotado de amplo curso de articulação, acompanha as irregularidades do terreno e mantém o ângulo de ataque constante. Transmissão por meio de correntes e rodas dentadas permite a completa articulação da linha sem aceleração ou desaceleração do mecanismo de dosagem, bem como a absorção de irregularidades do conjunto e do terreno possibilitando a padronização da profundidade na distribuição da sementes no solo, possibilitando melhor aproveitamento do grão e produtividade.

Utilização de buchas elaboradas em materiais especiais e com proteção por vedação através de retentores elimina a necessidade de lubrificação nas articulações da linha pantográfica. Criando desta forma um sistema prático e eficiente no plantio de grãos em larga escala.

A regulagem de pressão é feita por alavanca rápida e sistema de travamento para transporte ou plantio de grãos em espaçamentos tradicionais, eliminando a necessidade de desmonte das mesmas.

3.2 Magma - Software de simulação numérica

Software de simulação numérica é considerado uma evolução de extrema importância tecnológica na indústria e institutos de pesquisa. Uma ferramenta de grande avanço tecnológico e conceitual, que apresenta previamente com sua simulação, o resultado dos ensaios podem auxiliar nos ajustes antes de aplicar o projeto de alimentação definitiva do molde, evitando perdas ou atrasos de entrega, considerando que o sistema de alimentação estaria correto.

Esse projeto computacional parte de dados definidos previamente no processo, com base nas teorias sobre fundição e técnicas aplicadas. Da mesma forma, dificilmente uma empresa utilizará exatamente os mesmos dados ou técnicas para desenvolvimento de determinada classe de fundido, pois as variações fazem parte de cada empresa em função de pequenos detalhes e esses, por sua vez,

alteram os processos entre organizações. Essa tecnologia auxilia e prevê erros que podem ser corrigidos antes da execução evitando perda e atrasos.

A utilização destes softwares, auxiliam também em ensaios que não podem ser realizados em função de seu custo e complexidade, por exemplo, indústria aeronáutica ou de armas nucleares. Não há possibilidade de se fazer um teste seguro sem antes prever todas suas variáveis, tanto de erro quanto de acerto.

3.3 Objetos de ensaios

Os ensaios realizados com o software de simulação numérica utilizaram dois modelos de ferramentais como base de estudo. Esses dois modelos foram propostos de formas diferenciadas em seu sistema de alimentação das peças com metal líquido, para verificação de possíveis variáveis ou interferências que o leiaute A ou B utilizados na simulação numérica através do Magma, nos resultados referentes às tensões residuais do ferro fundido, que possivelmente possam ser gerados durante o processo de fundição.

3.3.1 Primeira versão do projeto do pantógrafo na semeadeira

Na Figura 20, a imagem mostra o ponto de fratura do componente do sistema pantográfico e a primeira versão do projeto, com um perfil diferente do atual, que será mostrado em seguida.

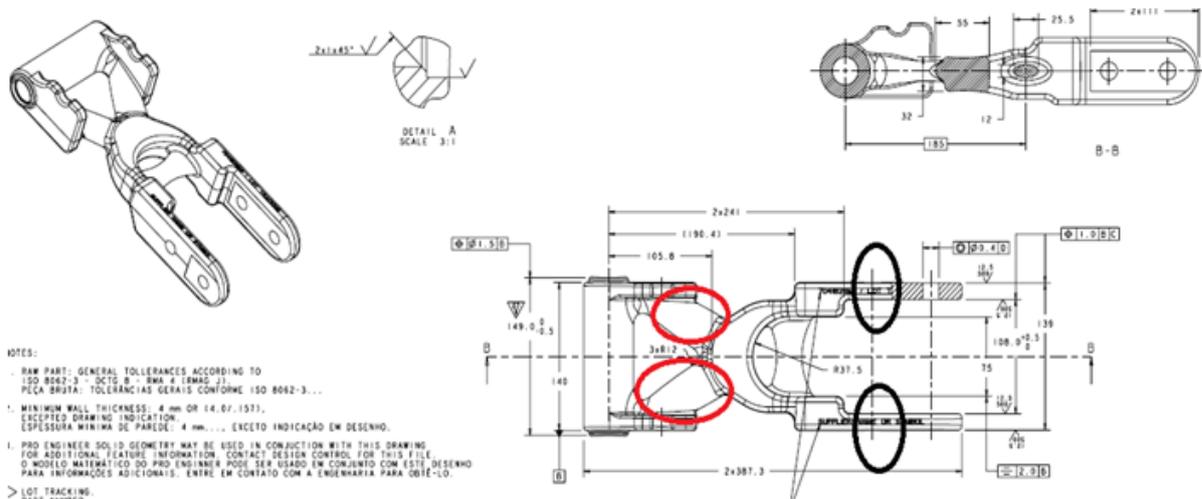


Figura 20 – Primeiro projeto do suporte pantográfico

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)

Na Figura 20 identificam-se os pontos com fragilidade (possibilidade de trinca) do item através dos pontos identificados por círculos que evidencia a possibilidade ou tendência à fratura do mesmo, ocorrido nos testes de bancada. Sua fratura ocorreu prematuramente em função da fragilidade do componente, o que necessitou a verificação de um novo perfil da peça e que apresentasse maior resistência ao esforço solicitado na aplicação do componente na semeadeira.

3.3.2 Novo projeto do suporte do pantógrafo

Em função da fratura do item, ocorrida no teste de bancada, que simula os esforços que o componente sofrerá durante o plantio, fica evidente a necessidade de alteração do projeto. Na Figura 21 verifica-se a mudança de perfil da peça, a qual atendeu a necessidade da aplicação do componente na máquina, suportando o esforço de uso da semeadeira. O projeto foi alterado tornando uma peça com geometria mais uniforme eliminando variações geométricas, deixando a peça mais uniforme em seu perfil, evitando com isso pontos de fragilidade. Depois das modificações com a criação de um novo projeto, novos testes de bancada e de campo foram feitos com aplicação de esforços de acordo com as exigências do plantio, verificando-se com isso a eficácia do projeto.

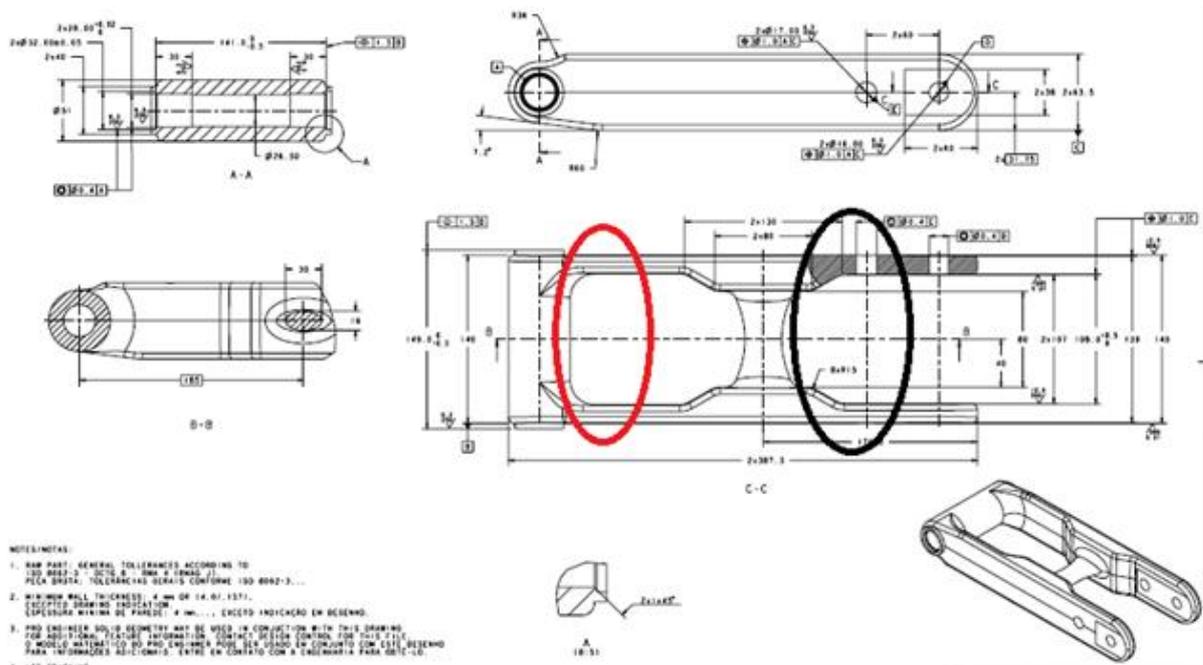


Figura 21 – Versão atualizada do pantógrafo

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)

As regiões com maior esforço sofrido na sua utilização, não se modificou em relação à anterior, mas pode-se verificar uma mudança de perfil que atendeu a solicitação dos esforços pela máquina, mais especificamente do sistema pantográfico.

3.4 Processo de fundição para fabricação das peças

Para uma verificação eficiente de resultados, é proposto duas versões de diferentes layouts para o processo de enchimento por gravidade do molde de fundição em areia verde. Essas diferentes disposições das peças no ferramental de fundição e o sistema de alimentação, serão estudadas a fim de identificar o comportamento do pantógrafo e verificação de possível variação no comportamento estrutural do item.

O objetivo principal é a identificação de uma possível variação ou fragilização nos pontos de formação de tensões residuais do material no item, que possam

comprometer o desempenho e resistência ao esforço da peça em sua aplicação no conjunto pantográfico da plantadeira.

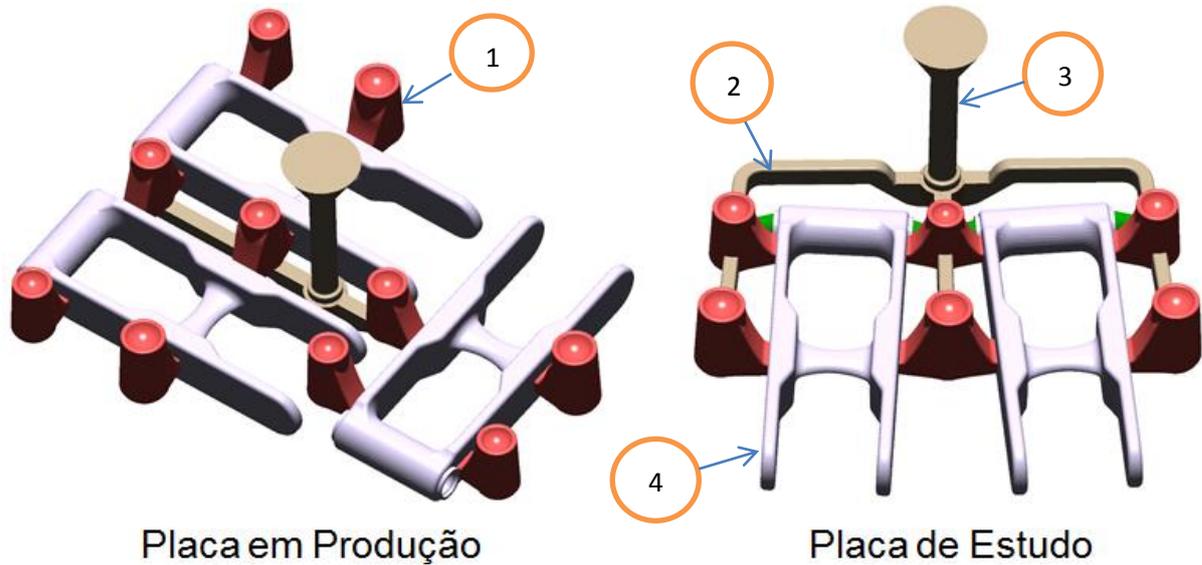


Figura 22 – Geometrias propostas de vazamento

Fonte: Magma – Software de simulação (2013)

Na Figura 22, as duas versões que foram analisadas através dos resultados da simulação numérica no Magma, onde são dispostos dois formatos de layout das peças no ferramental de fundição para análise do fundido no processo de solidificação e formação de pontos de tensão, durante o resfriamento do molde de areia verde.

A primeira versão está identificada na Figura 22 como “placa em produção” e a segunda versão, como “placa de estudo”. Da mesma forma fica identificado:

- através do numero 1 o massa lote, que tem por finalidade dar suporte de abastecimento de metal a peça durante o resfriamento;
- o numero 2 por sua vez identifica o canal de enchimento que faz a ligação entre o canal de descida e o canal de ataque na peça;
- já o numero 3 identifica o canal de descida, que é o orifício do molde por onde o metal líquida preenche a cavidade do molde de areia verde;
- o numero 4 identifica as peças que estão sendo analisadas e verificadas dentro deste estudo.

Desta forma ficam identificados os principais elementos que compõem a ferramenta para fabricação do suporte do pantógrafo na fundição. Esta estrutura montada com o sistema de alimentação se faz necessária para enchimento do molde e garantir que as peças estejam conforme especificação de qualidade e projeto.

3.4.1 Placa em produção

Nessa primeira versão, visto na Figura 22, é o layout do ferramental que está em produção atualmente com seu sistema de alimentação. A análise está baseada em comparar com a versão proposta para identificação de possíveis variáveis e melhorias que possam ser identificadas. O ferramental possui três peças com posicionamento em paralelo de duas peças e a outra na diagonal, criando diversos fluxos de metal nas cavidades do molde.

Nesse processo, o metal percorre as galerias formadas na moldagem que compõe o sistema de alimentação e a cavidade das peças a serem vazadas.

No perfil de formação das peças e canais, há possibilidade de formação de algum ponto de tensão que o metal criará por conta do perfil e tempo de resfriamento necessário em função do volume de metal vazado.

O perfil da peça não é alterado em nenhuma das versões, pois o projeto desenvolvido pelo cliente não permite e também não é o objeto principal de análise, mas somente sua disposição e sistema de alimentação modificado em função da quantidade de peças produzidas em cada um dos sistemas de alimentação.

3.4.2 Placa de estudo

A placa de estudo ainda na Figura 22, como sendo a segunda alternativa de melhoria de processo, possui apenas duas peças e com um sistema de alimentação mais simplificado que o anterior, que apresenta menor fluxo de material líquido, direcionado de forma mais direta nas cavidades do molde apresentando um comportamento diferenciado ao anterior.

Nessa proposta, a produtividade é reduzida com a retirada de uma peça, ou seja, 33.3% menor produtividade no molde. Essa redução é evidente, mas analisando sob outro ponto de vista, tem-se uma redução de consumo de metal por molde, pois há uma redução no volume de metal líquido no sistema de alimentação, que em relação à primeira versão, utilizava dez massalotes, que são excedentes de metal líquido no canal de enchimento do molde, com a função de alimentar a peça durante a solidificação do metal que sofre contração em função da redução gradativa da temperatura, passa a utilizar apenas seis unidades. Essa alteração no volume total de metal provoca uma alteração no rendimento metálico da árvore, proporção de peso peça em relação ao total do volume de metal vazado no molde de areia, fator que influencia na produtividade e interferência na definição de custo do produto.

Essa quantidade de massalotes é modificada em função da distribuição do sistema de alimentação que exige uma quantidade elevada, pois a peça possui massas isoladas em seu perfil e que precisam ser alimentadas diretamente em função da possibilidade de falhas no fundido. Essa variação da quantidade de massalotes intensifica-se, pois não há um resfriamento uniforme da peça. Com essa desuniformidade no resfriamento, impossibilita o preenchimento da peça e por consequência disso a contração do metal provoca a porosidade nesses pontos. Na proporção do rendimento metalúrgico, relação metal vazado e peça produzida, não se altera de forma significativa, mas a produtividade é reduzida. Obviamente essa nova proposta deverá ser mantida, desde que seja a única forma de garantir o resultado do objetivo da pesquisa, que é garantir a eliminação de pontos de tensões residuais das peças, prolongando ao máximo o tempo de resfriamento e atuação dos massalotes na alimentação uniforme da peça. Caso essa modificação não venha agregar ganho ao produto, será mantido de forma produtiva e que garanta a peça sem pontos de fragilidade em função da tensão dos materiais.

3.5 Análise da solidificação

A análise da solidificação pelo Magma, será uma evidencia dos resultados que o leiaute A e B, apresentam no processo de solidificação e formação de

possíveis tensões residuais pelo processo de fundição. O comportamento da solidificação do item posterior a desmoldagem, que ocorre com a peça ainda quente, em torno de 700°C ou seja no ponto eutetóide do ferro fundido, já que a temperatura ainda é elevada, mas não o suficiente para provocar grande influência na estrutura do metal em solidificação, apenas alteração de uma camada superficial do item e que não vem a afetar a dureza ou provocar deformações comprometedoras no item.

O tempo de solidificação dentro do molde é de grande importância a sua observação, pois o período destinado ao resfriamento do metal, tem ação direta na formação da grafita, que no caso do ferro fundido nodular, precisa ter uma grafita esferoidal para que atenda todas as especificações técnicas do material e por consequência a necessidade de atender a solicitação do componente da aplicação do sistema pantográfico da semeadeira.

No Anexo A, o diagrama de fases Fe-C em sua condição de líquido a sólido, apresenta as variações de estrutura de acordo com a diminuição da temperatura e solidificação do metal. Da mesma forma como ocorre o processo de solidificação de acordo com a redução da temperatura, também varia a estrutura do metal com a formação de grafita e demais condições de acordo com a classe definida previamente. O diagrama de fase por sua vez, é uma representação gráfica das temperaturas e composições para os quais várias fases são estáveis no equilíbrio. Em ciência dos materiais, os diagramas mais comuns envolvem temperatura e composição do metal. Na representação do diagrama de fases a temperatura líquidus, ou linha líquidus, a temperatura na qual o líquido inicia a solidificação sob condições de equilíbrio. Já na fase do sólidus, a temperatura durante a solidificação de uma liga na qual a última gota da fase líquida se solidifica.

A reação eutética uma transformação de fase na qual toda a fase líquidus se transforma no resfriamento em duas fases sólidas isotermicamente. A temperatura eutética, refere-se à temperatura na qual uma reação eutética ocorre. Por sua vez, a composição eutética acontece na fase líquida que reage para formar duas novas fases sólidas na temperatura de equilíbrio. O ponto eutético é determinado pela composição e temperatura eutética. Na composição hipoeutética que está à esquerda do ponto eutético, representado no diagrama de fases do fundido em seu processo de solidificação. Já composição hipereutética é que está à direita do ponto eutético em sua representação. Por sua vez, a fase primária é uma fase sólida a

qual se forma a uma temperatura acima de uma reação invariante e está ainda presente depois que a reação invariante for completada.

O objeto de estudo utilizado, é fabricado em ferro fundido nodular que por sua vez possui os elementos químicos de sua composição identificados na Tabela 2.

Nessa representação do diagrama de fases FeC do Anexo A, tem-se uma referência clara do comportamento do metal desde o vazamento no molde até a solidificação, apresentando todo seu comportamento em função do tempo para determinada condição, que a partir desse dado determina uma possível ação de correção na composição caso necessitar.

Em função da espessura das paredes do suporte do pantógrafo, após o enchimento do molde com metal líquido, a solidificação ocorre em torno de duas horas. Após este período já pode ser desmoldada, ou seja, quebrado o molde de areia verde para extração da peça, que apresentará uma temperatura em torno de 500 a 700°C, ocorrendo esta necessidade em função da liberação da linha de produção, caso contrário poderá ser mantido no molde por mais tempo possibilitando um resfriamento mais lento das peças.

3.5.1 Temperatura de desmoldagem

A desmoldagem da peça foi realizada com temperatura na fase eutetóide com 723°C aproximadamente, para os dois leiautes que foram utilizados na produção das peças, evidenciando desta forma a eficácia dos resultados tanto na simulação numérica bem como nas peças de amostra produzidas.

Na versão “A” do Anexo B, observando-se a escala no lado direito da figura, mostra que a temperatura maior está na parte central do leiaute e com pontos de maior resfriamento no entorno da mesma, identificados pelos pontos em azul.

Na imagem da versão “B” do Anexo B, a concentração de calor está na região central da árvore, mas com uma taxa de resfriamento de 150°C a menor, sendo que a desmoldagem ocorreu no mesmo tempo após o vazamento. O resfriamento também identifica-se a partir da escala à direita do Anexo B, conseqüentemente ocorrendo nas regiões mais delgadas da peça.

Quando da desmoldagem das duas versões com variação de temperatura, a precipitação da temperatura que estiver maior na desmoldagem, provoca um comportamento diferenciado do metal em sua solidificação. A estrutura cristalina do metal poderá tomar um formato diferenciado, seja de cubica de face centrada, que conterà um átomo em cada vértice do cubo e um átomo em cada face do cubo, ou de cubica de corpo centrado que por sua vez terá um átomo em cada vértice e outro no centro, o que proporcionará uma resistência maior ou menor ao esforço aplicado. No caso de peças finas e desmoldadas com temperatura muito elevada, cor amarelada e acima da eutetóide de 700°C, poderá ocorrer coquilhamento e elevados pontos de tensões do material. As tensões residuais acima da tensão admissível que para este projeto está próximo a 120MPa, poderá provocar a fragilidade do produto, conseqüentemente fora de especificação do ferro fundido nodular e não atender o esforço exigido pela máquina.

Nas duas versões a desmoldagem ocorreu na temperatura eutetóide, abaixo de 723°C. Na versão “A” utilizada para produção, a concentração de temperatura mais elevada na região central das peças em função do volume de metal, pois cada molde produz três peças.

3.5.2 Fração de ferrita

A formação da ferrita ocorre durante o resfriamento, variando de acordo com o processo da fundição considerando fatores como resfriamento da peça, desmoldagem e composição química, verificado no Anexo C, onde a região central possui maior concentração de ferrita, estrutura com maior fragilidade do componente.

Ainda no Anexo C pode-se identificar também uma variação entre a versão “A” e “B”, onde a maior fração de ferrita está na região central da árvore e com maior aceleração de resfriamento na região externa da árvore da versão “B”.

Nos pontos de maior fração de ferrita, a peça terá uma fragilidade, verificando-se nos Anexos C e D maior em relação ao restante da peça. Essa verificação não comprova que a peça como um todo será frágil ao ponto de comprometer sua aplicação, mas tende no caso de ocorrer quebra serem os pontos

de maior probabilidade, sendo que a uniformidade da sua estrutura é importante para que as variações sejam menores possíveis, já que os esforços incidem em toda sua extensão e não somente em pontos previamente definidos pelo projeto.

3.5.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do material foram definidas em função de sua composição química e processo de resfriamento. A análise dessas propriedades, podem ser feitas via software de simulação numérica ou outros métodos de ensaio que não aplicam-se neste caso.

No Anexo D, pode-se verificar os pontos de maior dureza do material nas regiões mais externas do molde, essa alteração de dureza ocorre principalmente pelos seguintes fatores:

- aceleração de resfriamento;
- pontos mais delgados das peças;
- menor concentração de calor no molde;
- concentração de metal mais velho no molde (primeiro a ser vazado).

A região central das peças nas versões “A” e “B” do Anexo D, apresentam menor dureza devido a fração de ferrita presente na região. A base de análise e definição das propriedades mecânicas do material, é a dureza do material em sua extensão observando-se os pontos de maior esforço do item. A dureza é identificada na escala ao lado direito da imagem com referência a escala Brinel (HB) onde a maior dureza caracteriza maior fragilidade da peça. Pode-se identificar pontos de grande variação da dureza na mesma peça possivelmente em função do acelerado resfriamento. Essa variação da dureza encontrada na simulação, não pode ser considerada fator de comprometimento da qualidade da peça, mas necessita atenção na análise do mesmo e tomada de ação, a fim de evitar possíveis fraturas no produto. A margem de variação da dureza está dentro de uma faixa aceitável de até 250 HB, considerando composição química, ensaios de tração e dureza variável que cada classe de fundido utiliza.

3.6 Análise das tensões residuais dos materiais

A análise de tensão dos materiais detém-se nas observações dos pontos de maior esforço e intensidades destes e a tensão residual propriamente dita que o material apresenta. Pontos esses que podem provocar trincas, fragilidades e deformações da peça se a intensidade do esforço for maior que a tensão admissível. As tensões provocam uma redução da capacidade de resistência em função de que a estrutura cristalina do metal direciona sua resistência à contração entre moléculas, com isso ao sofrer um esforço direcionado em outro sentido, provoca trinca inicialmente e quebra da peça em seguida. O que pode ocorrer também em função dos pontos de tensão, é a redução da flexibilidade e maleabilidade do material tornando-o rígido, conseqüentemente provocando desgaste nos pontos de maior esforço conseqüentemente a redução da vida útil, por não possuir uma condição elástica exigida pela sua aplicação, facilitando desta forma formação de trincas nesses pontos.

Os esforços aplicados sobre a peça, somados com as tensões residuais do fundido, geram uma sobrecarga no elemento que não apresentará força de reação compatível ao esforço aplicado gerando um desequilíbrio estrutural, por sua vez não resistindo a essa exigência. As tensões aplicadas podem ser de tração ou compressão, ditas como tensões normais. Consideram-se os pontos de tensão e esforços já citados no texto anteriormente, como fator decisivo na garantia do produto.

3.6.1 Deformações

No Anexo E a apresentação da deformação dos materiais, dentro de sua aplicação do layout “A” e “B”, com diferencial na quantidade de peças no ferramental de fundição e disposição das mesmas. Além das duas propostas apresentadas nos leiautes A e B, existem diferentes pontos de concentração das temperaturas maiores e menores que podem proporcionar a maior concentração residual das tensões,

sempre levando em conta o mesmo tempo de vazamento e resfriamento dentro do molde e suas diferenças dentro dessa condição específica de cada situação.

A escala lateral direciona a informação do leiaute considerando as cores cinza e azul como os pontos de extrema variação, medida em mm de deformação.

De acordo com o esfriamento precoce da peça a possibilidade de maior deformação é evidente.

Essa alteração estrutural de perfil tem sua variação acentuada não somente pela redução de temperatura em função de sua distribuição e aglomeração de maior volume de ferro líquido, mas considerando também o perfil da peça e “amarração” pelo sistema de alimentação em seu entorno. O sistema de alimentação, além de concentrar maior volume de metal, envolve a peça com os canais de ataque e suporte na manutenção de temperatura mais elevada por conta dos massalotes.

O deslocamento na peça evidenciada na Anexo E precisa ser considerada no projeto do item, de forma que não interfira na usinagem e montagem do conjunto pantográfico.

3.6.2 Intensidade do deslocamento

O resfriamento da peça, em maior ou menor velocidade provoca uma variação de deformação proporcional à intensidade da velocidade de resfriamento. No caso de um resfriamento rápido, a tendência a dureza maior é facilitada, já no resfriamento mais lento a acomodação das moléculas é lento e com isso a uniformidade da dureza é maior. Para efeito de demonstração, pode-se comparar o Anexo E com o Anexo F, onde são visíveis os pontos de deformação e de acordo com a escala à direita da figura a intensidade de sua ocorrência.

No Anexo F, fica evidente os pontos de deslocamento que a peça sofrerá em seu processo de resfriamento. Essa deslocamento deverá ser prevista na montagem do item ou inclusão de um processo de contenção ou compensação desta variação, como por exemplo, retentor entre as hastes da peça que obviamente tem a função de reter a mesma durante o resfriamento. Esta possibilidade precisa ser analisada para não criar novos pontos de tensão na peça que possam corrigir um defeito e gerar outro, no caso o aumento das tensões nessa região do retentor.

Embora o sistema de alimentação das duas ferramentas sejam distintos, o empenamento das peças é o mesmo. A característica de solidificação do canal no sistema das ferramentas em estudo faz com que o mesmo “acompanhe” a deformação já característica do sistema, ou seja, ela não restringe a deformação a ponto de modificar o empenamento atual.

As tensões ocorridas na solidificação são resultados unicamente pelo processo de fabricação, composição química e resfriamento das peças, não havendo nenhuma outra interferência de forças externas na peça.

Outro sistema de correção ou eliminação do deslocamento é a usinagem da região onde ocorrer montagem de outro componente formador do conjunto de aplicação. No caso específico desse item, ocorre a usinagem da parte interna e externa o que compensa a deformação não influenciando na montagem do mesmo.

Como o conjunto pantográfico sofre grandes esforços de compressão e tração na sua aplicação, é preciso uma sincronia de dados e informações de todos os fatores envolvidos na sua construção. Além dos esforços internos e tensões residuais do ferro fundido nodular, as tensões dos solos e peso dos demais componentes, a variação de forças aplicadas ocorrerá em diferentes direções e intensidade das forças aplicadas. A soma dessas tensões e esforços pode aumentar os riscos de ruptura ou superdimensionamento caso cada detalhe não seja avaliado de forma específica e com intensidade.

Comparando-se os layouts “A” e “B” do Anexo F, evidenciamos através da escala de cores de que a variação é muito pequena entre as duas condições, pois ficam entre 1,95 mm a 2,10 mm à deformação da peça durante o resfriamento. Com isso pode-se concluir antecipadamente que o sistema de alimentação não tem influência sobre essa variação da peça e sim somente seu perfil.

Analisando-se o perfil da peça em específico, nota-se que em sua geometria mais delgada, existe uma deformação de 0,15 mm nas extremidades onde sua estrutura é fina causando uma alteração de perfil, evidenciado na escala de cores. Essa possibilidade deve ser verificada e caso não se consiga efetuar uma alteração por conta da aplicação, deve-se administrar a mesma dentro de uma condição técnica aceitável as exigências de aplicação do componente.

3.7 Tensões de von Mises

Tensões de von Mises, podem ser identificadas na estrutura de ligação entre as vigas principais da construção do item. Esta maior intensidade das tensões, não comprometem a estrutura, até porque são em um ponto de ligação e com intensidade de 50 MPa que é o que o produto resiste em sua aplicação.

Conforme informação citada no Anexo G, as tensões de von Mises são formas de avaliação dos materiais dúcteis, essa limitação deve ser observada sob risco de comprometer o produto.

Na aplicação do suporte do pantógrafo na semeadeira, a peça sofre uma força não superior a 120 MPa, tensão verificada nos teste de bancada com o componente do pantógrafo, dados não evidenciados em função do segredo de projeto, mas informados pelo fabricante e confirmado pela simulação do Magma, conforme Anexo G. Na simulação, o valor da tensão máxima identificada é de 360 MPa com coeficiente de segurança de 3, pois são as tensões específicas para ferro nodular, segundo Lopes (2005).

O valor de 120MPa, por sua vez, é considerado um esforço de aplicação baixo ao que a estrutura foi projetada que suporta até 360 MPa, não comprometendo a eficiência da peça se levada em consideração as tensões de von Misses.

Ainda no Anexo G, com a tensão apresentada já se pode antecipar como um fator, intensidade das tensões residuais, que não comprometerá o desempenho do suporte do pantógrafo na sua aplicação, pois o coeficiente de segurança é extremamente elevado se verificado que o coeficiente de segurança é de até 1,5 sobre o calculado.

As tensões de von Mises, tensões de referencia para materiais dúcteis, são resultantes do processo de solidificação do metal, levando em conta a análise do objeto de estudo. Nestes ensaios pode-se verificar que as tensões de von Mises não ultrapassam 50 MPa, implicando em um estado de tensões muito baixo no produto, já que seu limite de resistência de tração é superior a 300MPa.

3.8 Tensão residual principal

Na Anexo H, está clara a distribuição da tensão principal sofrida pelos itens em seus respectivos layouts. A identificação desta correta distribuição do stress da peça em seu processo de solidificação, conforme as demais análises são identificadas pela intensidade e distribuição de cores na escala ao lado direito do Anexo H. Ao analisarmos as tensões residuais geradas pela deformação, notamos que as mesmas são tensões normais de tração e apresentam uma direção ao longo de todo o sistema. Isto resulta em uma distribuição de tensões residuais de forma homogênea o que diminui o risco de ocorrer trincas no produto.

A distribuição homogênea das tensões da peça, evidencia que não haverá inicialmente um ponto específico com elevada tensão que possa comprometer o desempenho do suporte do pantógrafo. Essa formação homogênea é favorecida pelo direcionamento uniforme do material dentro da cavidade do molde que favorece um resfriamento de forma igualitária em toda árvore. Fator este, favorecido pelo sistema de alimentação, que ataca a peça em pontos de massas isoladas (espessura maior que a média) e o restante de seu perfil, de certa forma, mantém-se uniformemente distribuído.

A direção da deformação é igual para ambos os sistemas de alimentação propostos e simulados, não alterando a dinâmica da solidificação e resfriamento das peças no molde. Assim sendo, as tensões residuais geradas devem possuir as mesmas características, portanto fica claro no Anexo I, que a distribuição uniforme do enchimento do molde pelo metal líquido, resfriamento deste e a distribuição das tensões residuais do metal. Embora os sistemas de alimentação sejam diferentes, o processo de solidificação é bastante similar resultando em uma dinâmica de deformação parecida, principalmente na peça inferior do ferramental utilizada para produção. As intensidades das tensões estão em média 65 MPa em toda extensão da peça, verificada conforme indicação da escala de distribuição da tensão. A escala que evidencia uma intensidade da tensão de 65 MPa, demonstra a intensidade aceitável e que favorece a fabricação de um produto uniforme mesmo com diferentes sistemas de alimentação, ou seja, sua influência não reflete resultados negativos a aplicação da semeadeira.

3.8.1. Critério de trinca a frio

Na análise em relação a possibilidade de ocorrência de trinca a frio, evidencia os pontos de possível ocorrência de trinca. A ligação na parte central do suporte do pantógrafo, retém a maior tensão residual em função de sua espessura e exerce a função de ligação entre as colunas laterais da peça, além da ação do tempo de resfriamento e fluxo direcionado do material líquido quando vazado no interior do molde.

Os pontos circulados no Anexo J, representam a concentração de maior possibilidade de trinca a frio. A trinca a frio normalmente ocorre em pontos de uma baixa temperatura, o que impossibilita a união do material, provocando a separação entre 2 partes de material que apenas aproximam-se e não ocorre a fundição dessas. Outro fator que auxilia na formação de trinca fria, é onde a microestrutura possui baixa tenacidade, estrutura martensítica. As peças não apresentam tendência a formação de trinca à frio. As regiões de conexão apresentam as maiores tensões residuais, no entanto estas regiões não superam o valor crítico estabelecido pelo critério de ser maior que 120 considerando coeficiente de segurança 3.

O critério de trinca à frio, é definido através da forma em que ocorre o resfriamento da peça, tendo maior ou menor tempo até a solidificação. As regiões de menor espessura da peça tendem a esfriar de forma mais rápida que as demais em função do volume de metal no molde. O software de simulação numérica, analisa todos os parâmetros de criação da peça, tornando a análise idêntica a situação real no comportamento da região interna do molde, tornando os dados reais na simulação.

A composição química, tempo de resfriamento dentro e fora do molde, são os principais fatores a acentuar essa característica. Mas a concentração de várias variáveis do processo de fundição pode agravar esse processo de possível fragilização da peça, como por exemplo, desmoldagem antes do tempo, em função de se tratar de um processo vulnerável, pois é por muitas vezes dependente do processo manual dos operadores.

A forma de distribuição do sistema de alimentação ou números de peças, inicialmente são fatores que não interferem nessa alteração estrutural.

São detalhamentos menores e mais específicos que fazem a modificação mais pertinente à fragilização da peça independente de sua geometria.

Comparando os resultados expressos nos Anexos J e K, verifica-se que não há diferença no comportamento da simulação. O layout da placa “A” e placa “B”, não tem relação nenhuma na formação de trinca a frio. Esse defeito ocorre unicamente na forma de resfriamento do metal líquido dentro do molde. Mesmo que desmoldado com temperatura acima de 750°C, a formação de trinca a frio já está formada na fundição do item. Como o estado de tensões residuais é similar nas duas versões, as tendências de formação das trincas são iguais e concentradas na região central do conjunto de peças fundidas.

3.8.2 Gráfico de tendência a formação de trinca a frio

Na curva “A” do Anexo L, para os 2 casos, mostram claramente que em nenhum momento a tensão de referência ultrapassa o limite de resistência do material. Dessa forma pode-se definir que o projeto está dentro da especificação e necessidade que o item exige em sua aplicação. A curva “B” é a representação da resistência do material para a aplicação do sistema pantográfico da plantadeira. Todo sistema de movimentação precisa de uma determinada evolução técnica e aplicado um coeficiente de resistência a essas forças aplicadas.

No Anexo L, é possível notar pelo gráfico que nenhum momento a tensão residual de referencia ultrapassa o limite de resistência do material, identificando desta forma quais são os pontos de maior tendência a formação de trinca a frio.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo realizado com o suporte do pantógrafo, possibilita uma conexão entre as simulações numéricas e a AP, em função da utilização de um equipamento ligado a este segmento agrícola. A semeadeira pode ser utilizada na agricultura de precisão em função de sua construção adequada a esta aplicação. A necessidade de verificação do suporte do pantógrafo, é com a possibilidade de concentração de tensões residuais e que possam afetar a qualidade do produto que sofrerá esforços em função dos tipos de solos e carga aplicadas durante o plantio, facilitando a formação de trincas e conseqüente quebra do componente.

Ao final desse estudo de pesquisa, pode-se concluir que o suporte do pantógrafo da semeadeira, atende a expectativa de sua aplicação. Considerando as inúmeras forças aplicadas a este componente e ao conjunto pantográfico onde é montado e suas variáveis de fabricação, tais como tensão residual dos materiais, esforço de resistência dos solos e peso dos componentes montados no pantógrafo, sendo que o item atende aos esforços de aplicação no produto.

Na simulação e verificação das tensões residuais para os dois sistemas de canais de alimentação utilizados no molde, o atualmente aplicado na fundição da peça e a segunda versão, como nova proposta de aplicação possibilitando a comparação entre as duas situações, além de uma possível formação de tensão residual nas peças, nota-se que não há diferença muito grande ao que se refere as formação de tensões residuais, entre os mesmos, isto porque o sistema escolhido para estudo acaba acompanhando a característica de deformação da peça.

Como as tensões de 50MPa encontradas são consideradas baixas, sendo que o componente foi projetado para suportar até 360 MPa, o risco de formação de trincas é baixo visto que o limite de escoamento do material é garantido por um coeficiente de segurança 3 referente as tensões aplicadas ao produto. Com esse fator determinante, reforça a condição de que o item está dentro da especificação exigida para sua utilização.

De qualquer forma, a variação entre as duas propostas não chega a comprometer a aplicação e o desempenho do item, no conjunto pantográfico

montado, havendo ainda a possibilidade de alteração no processo agindo diretamente no tempo e condição de resfriamento.

Entre as tensões residuais do ferro fundido e as tensões estruturais dos solos, ha uma relação em função da resistência que o solo oferece no arraste da máquina. Caso o suporte tivesse apresentado alta concentração de tensões residuais, somadas a resistência do solo durante o plantio, haveria a possibilidade de fragilização do suporte na utilização da semeadeira, o que não se comprovou.

A versão original do produto visto na Figura 20, a qual apresentou trinca e posterior quebra ainda no ensaio de bancada, não teve a versão simulada por se considerar um processo desnecessário sem agregar nada ao estudo em questão, pois já havia sido descartada do projeto.

Com base nos resultados das simulações, conclui-se que o perfil determinado para as peças do pantógrafo está de acordo e podem ser definidas como ótima em seu projeto. Toda a possibilidade de variação de processo, formação de trinca a frio, concentração de pontos de tensão, não compromete em nenhum momento a capacidade aplicativa da peça evidenciando desta forma a eficácia do projeto definido.

Evidencia com esse estudo que o projeto apresentado atenderá a aplicação do equipamento, atendendo a necessidade do agricultor que utiliza AP em sua atividade produtiva. Dessa forma, pode-se verificar a eficácia do projeto dentro de uma variação de esforços aplicados, sejam pela resistência dos solos no processo de plantio, bem como a composição química do ferro fundido utilizado na fundição do conjunto pantográfico.

O item estudado é parte de um projeto onde novas tecnologias de plantio estarão sendo ofertadas para a AP e com um sistema de funcionamento que auxiliará no aumento da produtividade e confiabilidade cada vez maior do implemento agrícola. Além da alteração do perfil do produto, outra modificação é em relação ao material, pois as peças foram alteradas de chapa de aço dobrado para ferro fundido nodular. Essa alteração tem por objetivo, redução de peso, custo e melhoria do processo de fabricação ou utilização, aliados à tecnologia de plantio e a otimização de um produto.

O trabalho foi desenvolvido com intuito principal em verificar através de simulação numérica pelo software Magma, qual a intensidade da concentrações de tensão residual no ferro fundido do suporte pantográfico. Estes resultados servem de

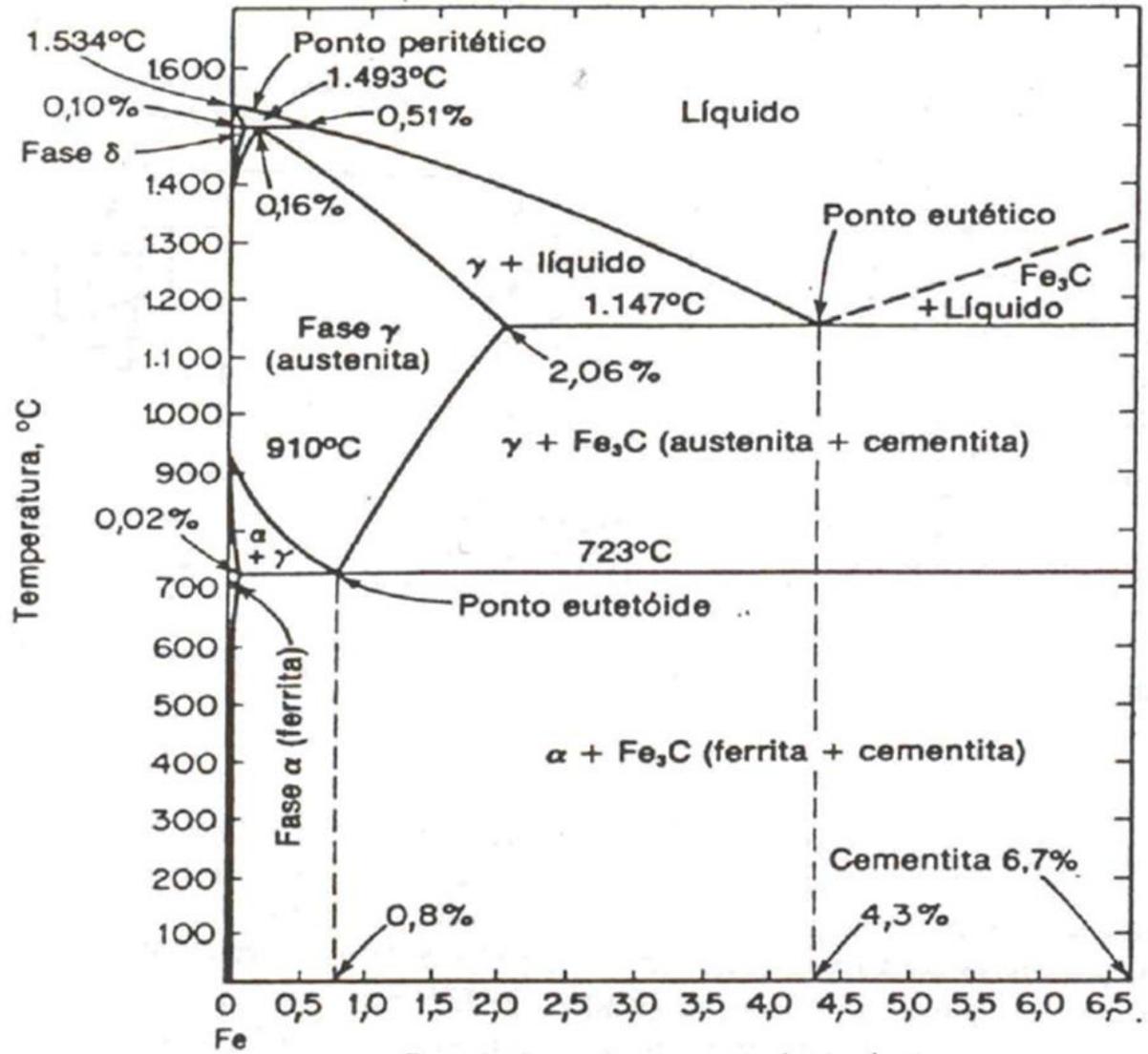
base para certificação de que a peça não está comprometida em função dos esforços que a máquina exigirá durante o plantio.

Conclui-se portanto que tanto o leiaute A ou B, não apresentam fatores que venham interferir ou provocar excesso de concentração de tensões residuais na peça, durante o processo de fundição. Observando os parâmetros técnicos de fabricação, composição química, análise e aplicação do suporte do pantógrafo na máquina, não haverá interferência que venha afetar sua resistência durante a aplicação na semeadeira. Considera-se desta forma o produto aprovado dentro da capacidade e necessidade de desempenho ótimo em sua utilização na lavoura sem comprometimento do equipamento e com expressivo coeficiente de segurança aplicado.

ANEXOS

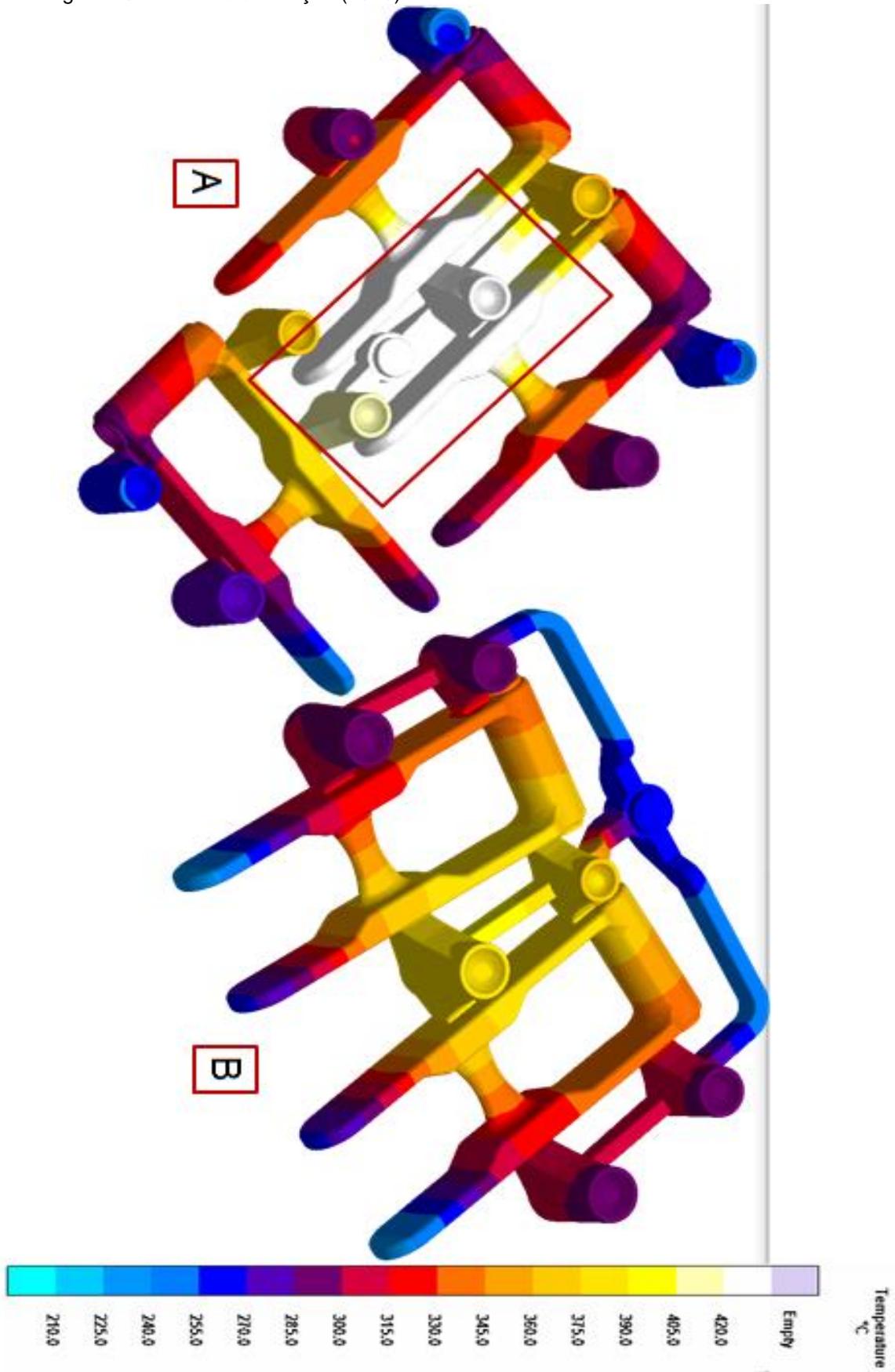
Anexo A – Diagrama de fase Fe-C

Fonte: Durferrit química (2014)



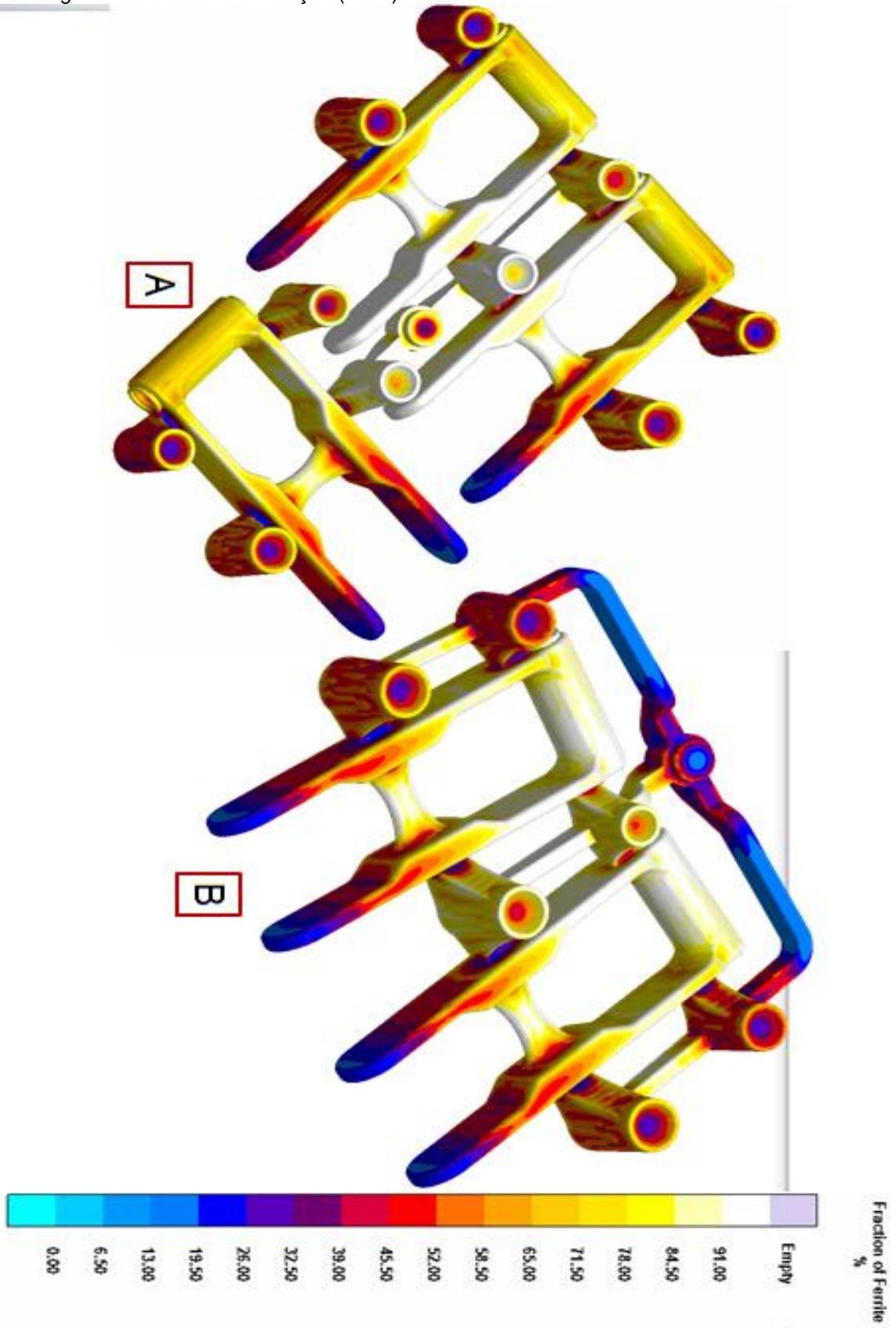
Anexo B – Temperatura de desmoldagem

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



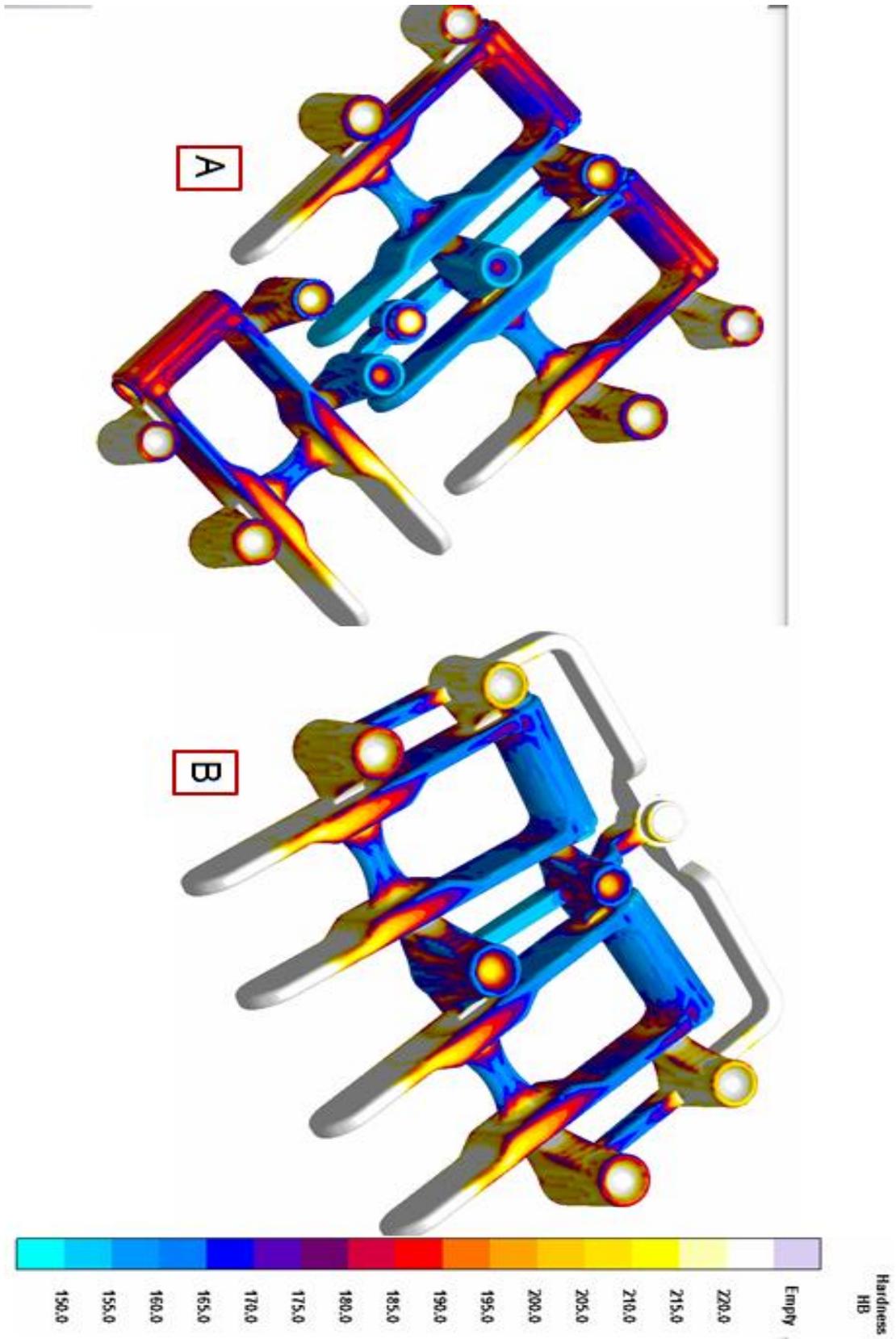
Anexo C – Formação da fase ferrita

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



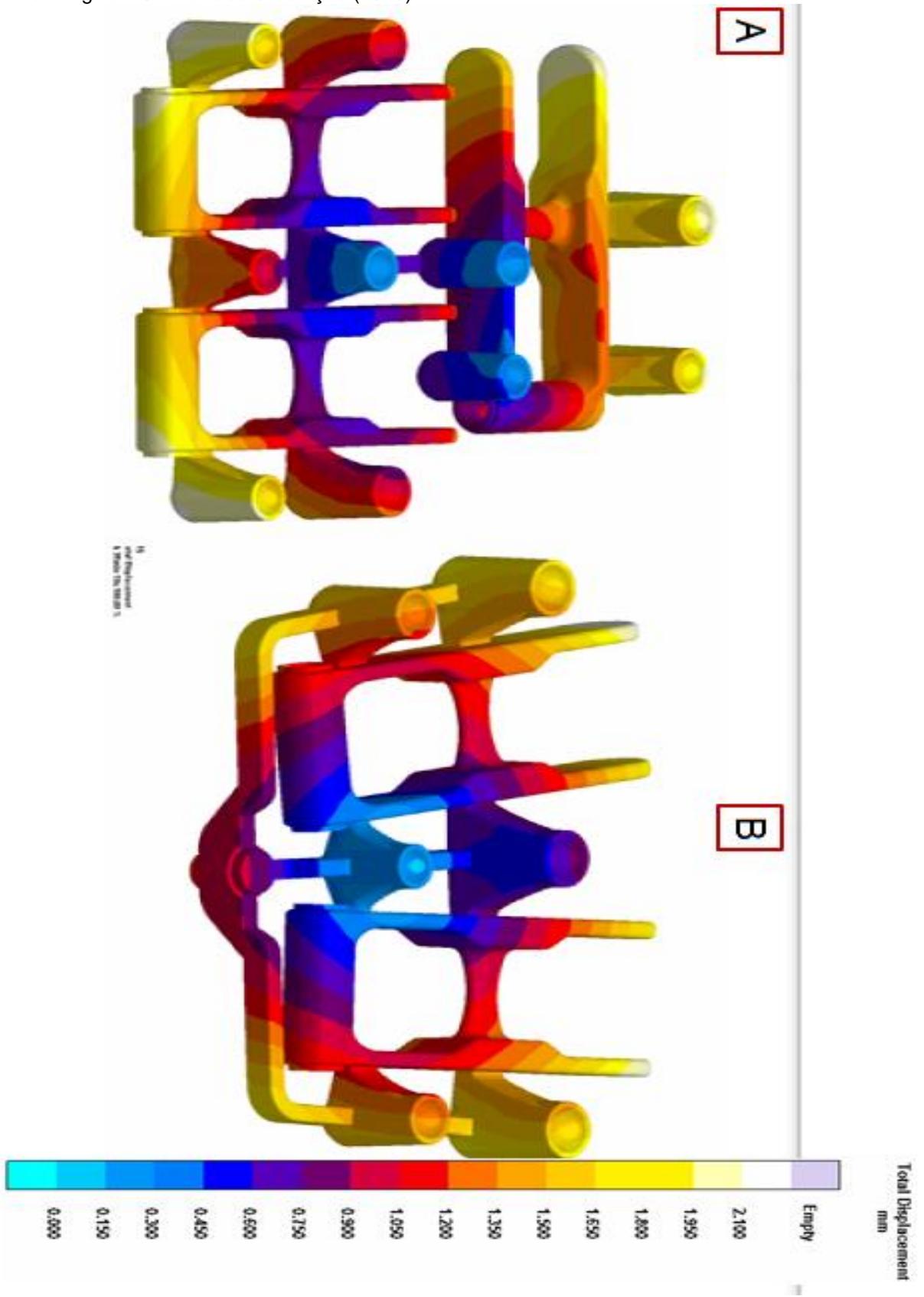
Anexo D – Propriedade mecânica dos materiais

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



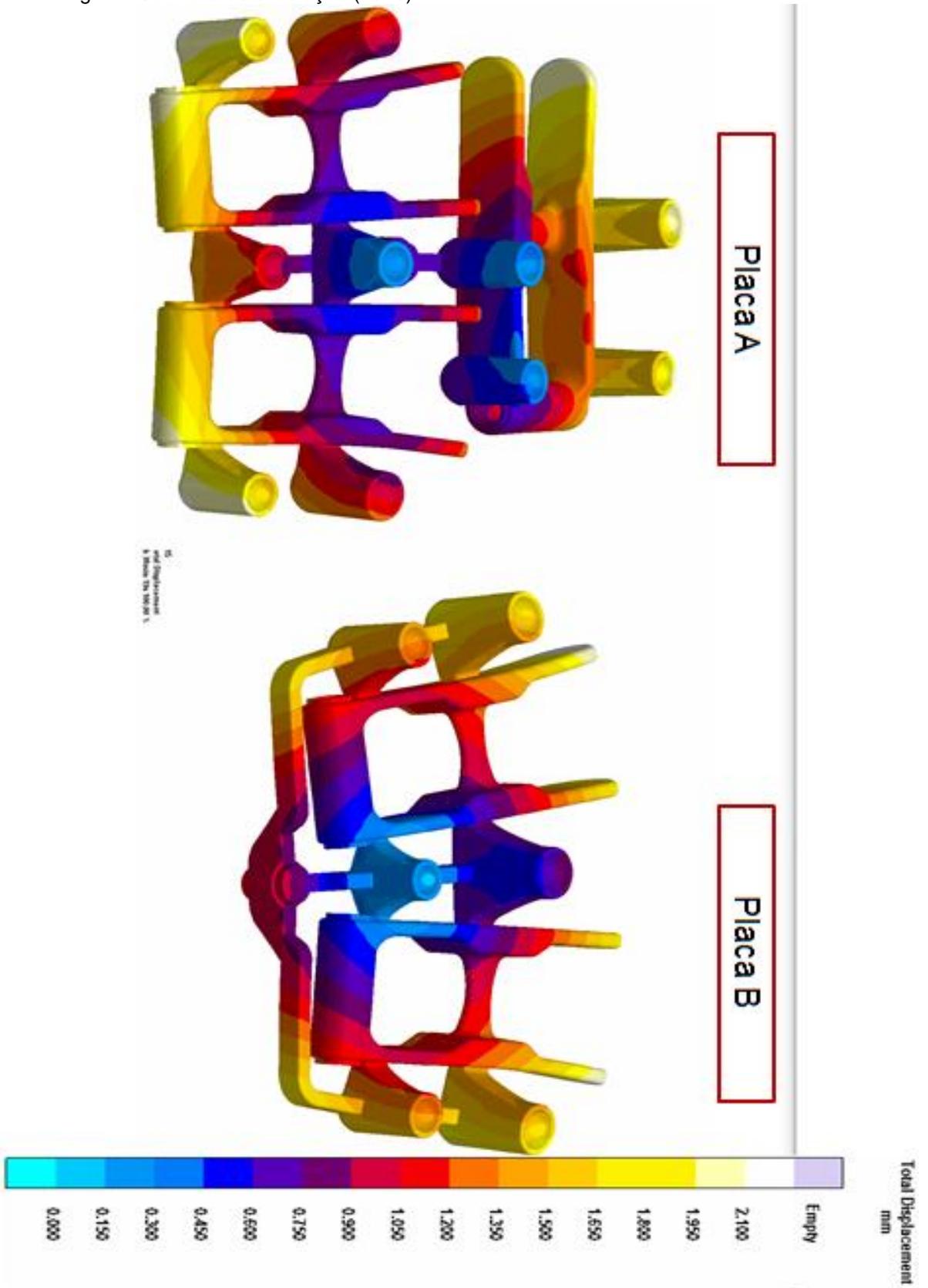
Anexo E – Deslocamento dos materiais

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



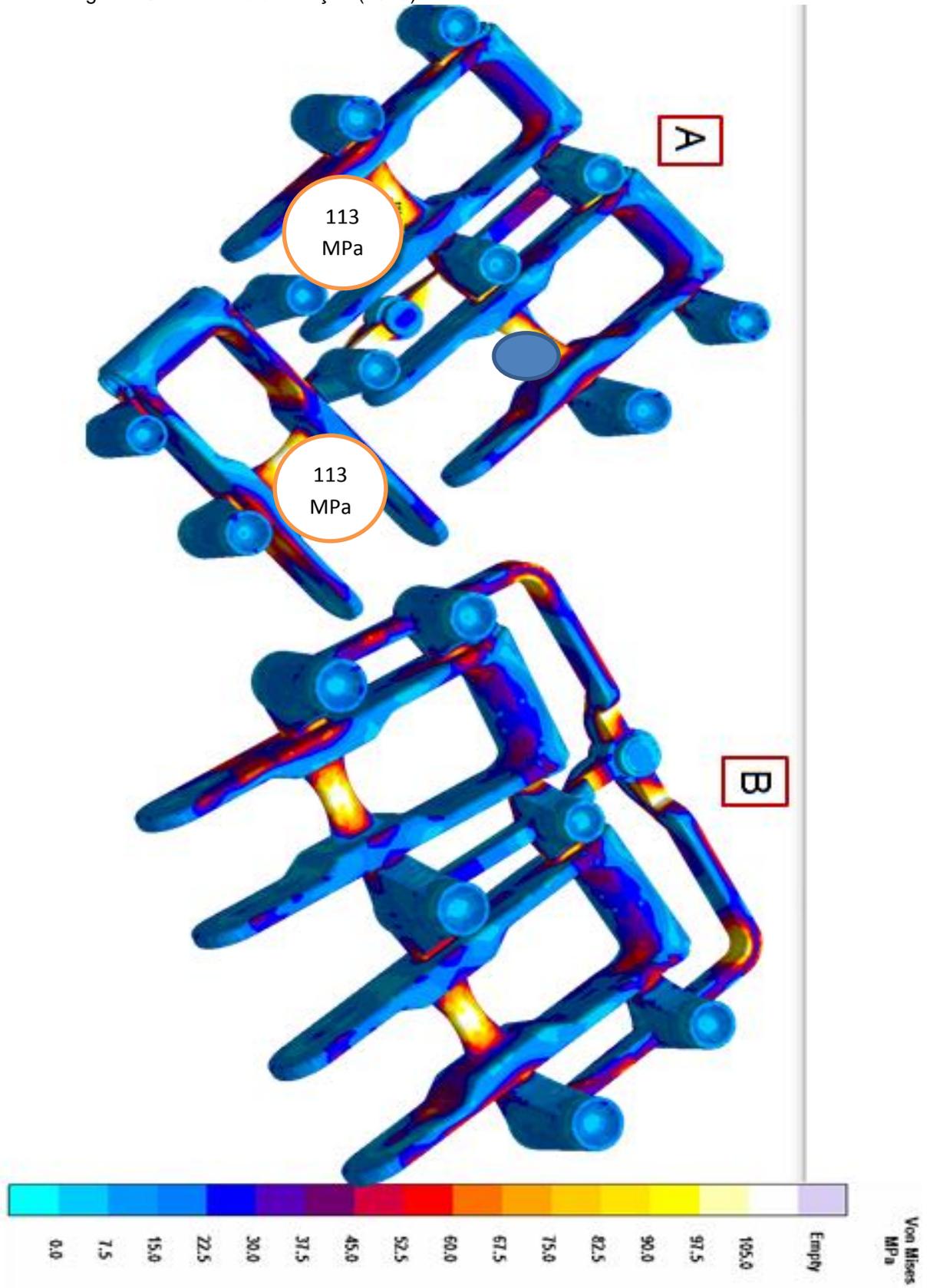
Anexo F – Intensidade do deslocamento

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



Anexo G – Tensões de von Mises

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



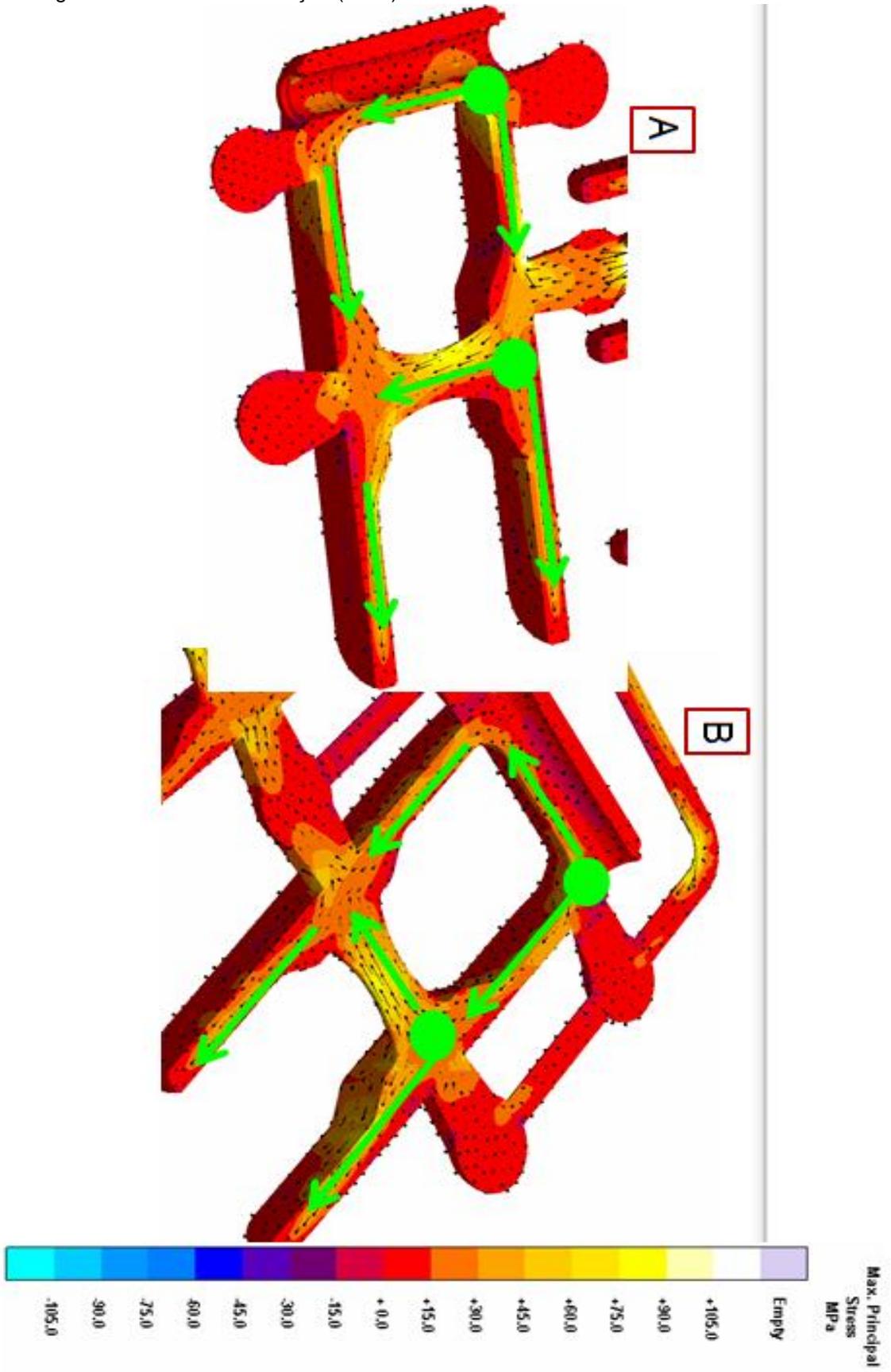
Anexo H – Tensão principal A

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



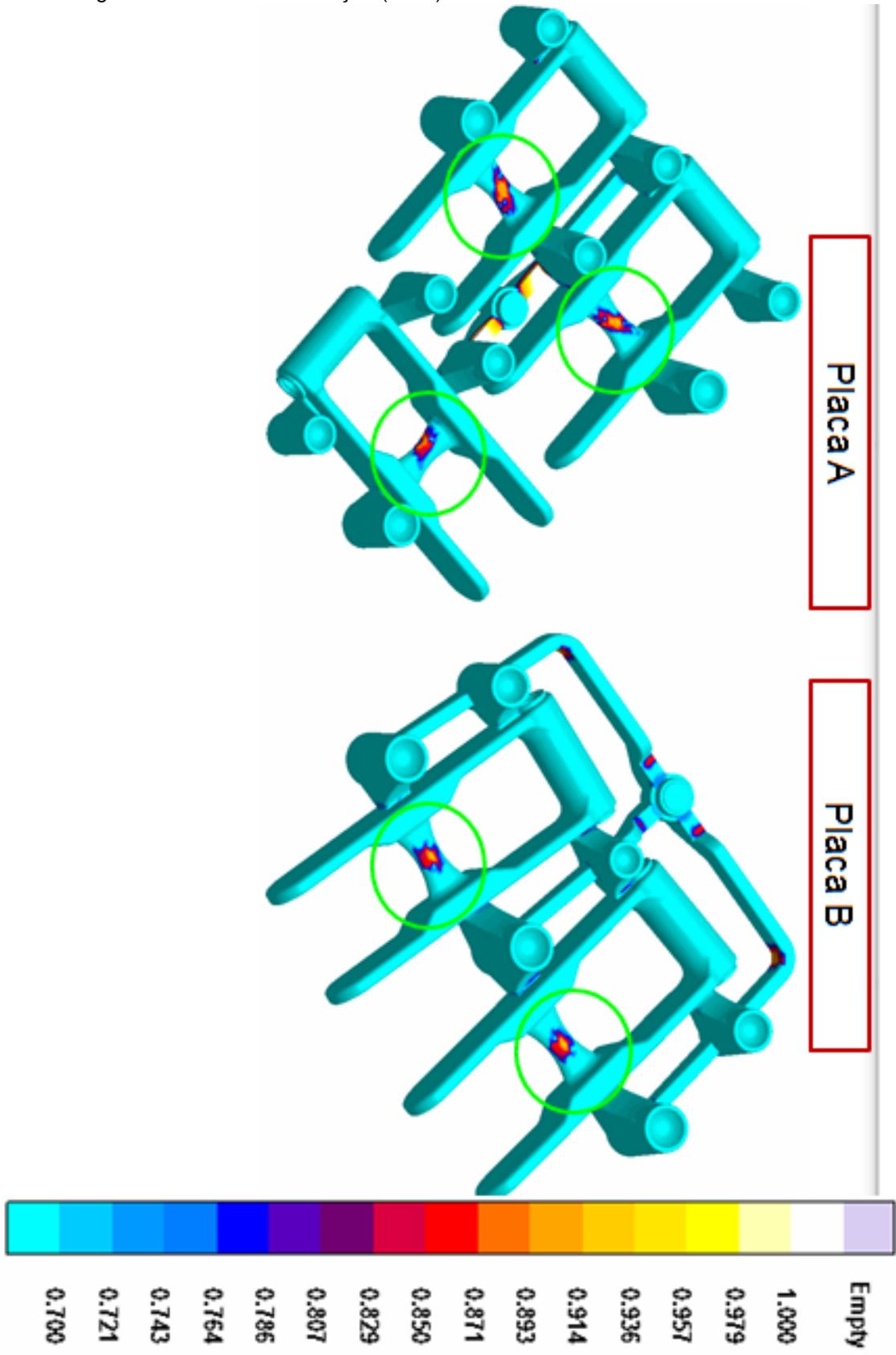
Anexo I – Tensão principal B

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



Anexo J – Critério de trinca a frio 01

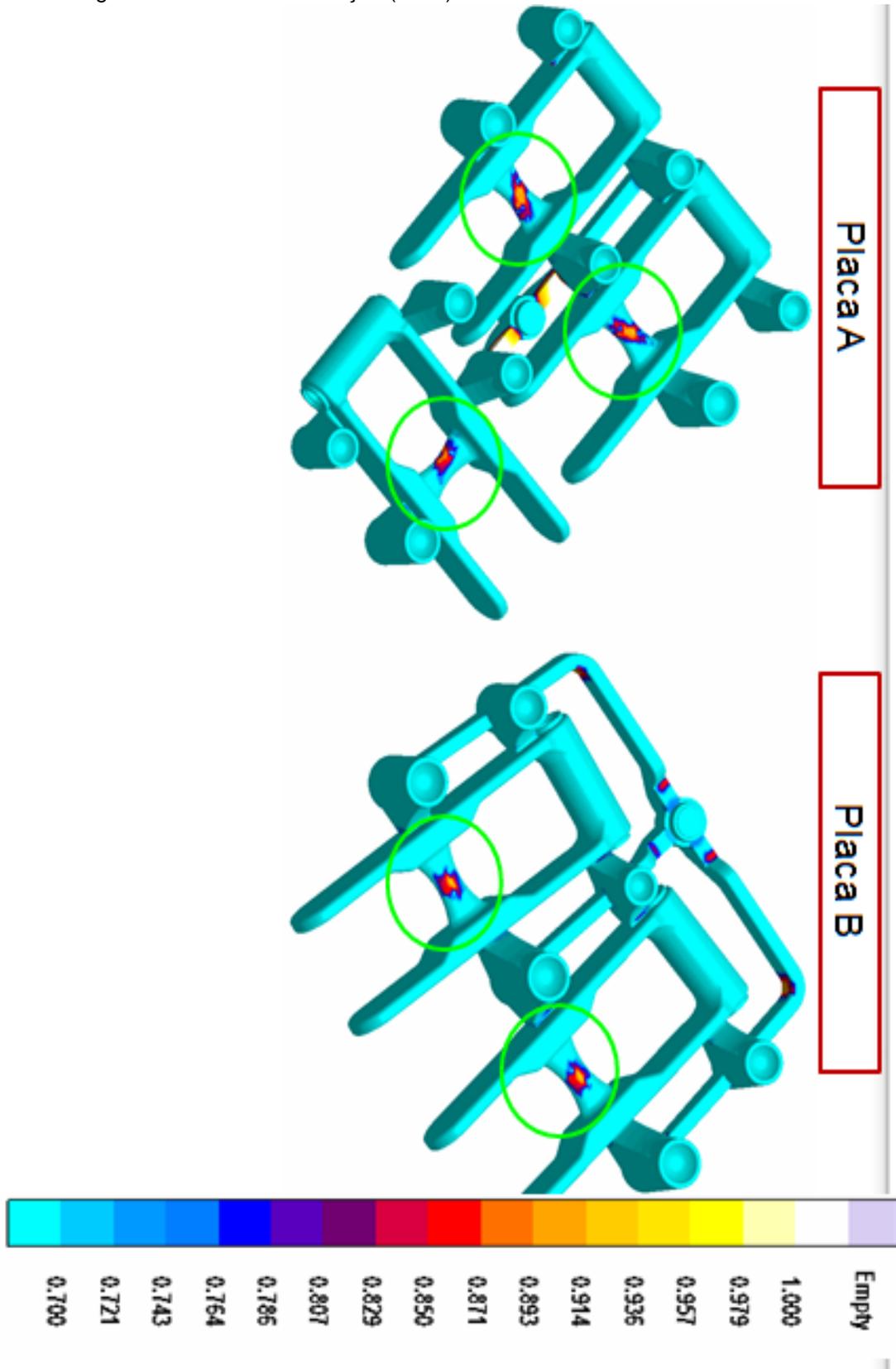
Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



Cold Crack

Anexo K – Critério de trinca a frio 02

Fonte: Magma - Software de simulação (2013)



Cold Crack

REFERÊNCIAS

AFONSO, L. de O. **O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular/ppt** (2009).

AGRO ECOLOGY. 2013 and the development. Disponível em: <http://www.frenchfoodintheus.org/spip.php>. Pesquisado em 18 de maio de 2014.

AMADO, T. J. C. et al. Agricultura de precisão: mapa de rendimentos e de atributos de solo analisados em três dimensões. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, 2011.

ARRIVABENE, V. **Resistência dos materiais**. São Paulo. Makron books, 1994.

BAÊTA, F. da C.; SARTOR, V. **Resistência dos materiais e dimensionamento para construções agrícolas**. Universidade Federal de Viçosa (Departamento de engenharia agrícola), 1999.

BARTELS, C. et al. **Gusseisenmit Kugelgraphit**, 2000. Disponível em: www.kug.bdguss.de. Consultado em 23/02/2014.

BASTOS, C. A. B. **Mecânica dos solos** – Departamento de materiais e construção – DCM/FURG. <ftp://ftp.ifes.edu.br/Solos/Apostila>. Consultado em 23/02/2014.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.. **Resistência dos materiais**, 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1996.

BENTO, D. A.; MORO, N.; AURAS, A. P. **Elementos de máquinas**: resistência dos materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

BILHARZ, J. **Gating Design with Ingate Filtration**. Process Engineer John Deere Foundry Waterloo, 2013.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica, Processo de fabricação e tratamentos**. v. 2, 2. ed. Editora McGraw-Hil Ltda. 1986.

FRANKLIN, A. R. **Um breve estudo sobre o ferro fundido nodular**, UEZO, 2009.

FRENCH FOOD in US. **Aplicação e vantagens do GPS na agricultura de precisão** (2013). – Disponível no site: <http://ag.topconpositioning.com/sites/default/files/PrecAgCatalog-7010-0899H-LTR-EN-Ir.pdf> (2013) - Consulta em 27/02/2014

HEINRICHS, R. **Estrutura dos solos** – Universidade Estadual Paulista – 2010

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 3. ed. Rio de Janeiro 1997.

KESSLER, S. E. **Defeitos de fundição**, SENAI, 2009.

LOPES, J. A. E. **Resistencia mecânica dos materiais** – FATEC- SO “Faculdade de Tecnologia de Sorocaba” – SP - (2005).

MASCIA, N. T. **Tração, compressão e Lei de Hooke** - UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas – SP / Faculdade de engenharia civil, arquitetura e urbanismo - Departamento de Estruturas – (2006)

MELCONIAN, S. **Mecânica técnica e resistência dos materiais**. 10. ed. Érica. São Paulo, 1999.

MENDES, T. **ppt: Simulação Numérica: o que é e para que serve?**– IFSC/USP (2009). Disponível no site: <http://lattice.if.sc.usp.br/>. Consulta em 23/02/2014.

NEW HOLLAND AGRICULTURE. **Revista técnica**. Semeadoras New Holland, 2012. Disponível no site: www.newholland.com.br/revistatecnica. Consulta em 10/01/2014.

Olive, Dr. Ing; Egner-Walter, Dr. Ing. **Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings**. MAGMA GmbH, Germany, Maxima Engineering, UK (2012)

OLIVEIRA, C. G. de; GUESSER, W. L.; BAUMER, I. **O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular**, 2009.

QUÍMICA DO BRASIL, DURFERRIT. **Diagrama Ferro Carbono**. Disponível no site: www.durferrit.com.br. Consulta em: 15 de abril de 2014.

SAXTON, K. E.; RAWIS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, Copyright © 2006. **Soil Science Society of America**.

SEQUINATTO, L. et al. **Sistema de preparo do solo, resistência mecânica a penetração, disponibilidade hídrica e rendimento feijoeiro**. Publicação do departamento de solos da UFSM. (2000).

SHAHA, S. K.; HANQUE, M. M.; MALEQUE, M. A. (2009). Prediction of heat flow through sand mould and its verification on the structure and property of gray cast iron. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)**, v. 5, n. 2, 2009.

SILVA, S. de L.; SANTOS, S. R. dos. **Máquina para semeadura, plantio e transplântio**. Unidade Estadual do Oeste do Paraná (Centro de Ciência Exatas e Tecnológica), 2000.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícola com a soja**. EMBRAPA, 1999.

VIEIRA, L. R. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico, **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 09-19, 2010.

VIEIRA, L. R. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. In: MASCIA, N. T. **Tração, compressão e lei de Hooke**, UNICAMP (Departamento de estruturas), 2006.

WALTER, E. A.; OLIVE, S. Using Stress Simulation to tackle distortion and cracking in castings - MAGMA GmbH, Germany, **Maxima Engineering**, 2013.