

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

MARCO ANTÔNIO BATISTA GUTERRES

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO POR METALURGIA DO
PÓ DE CUBO E DISCO DE EMBREAGEM MAGNÉTICA DE
COMPRESSOR DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - Nº 15)

CURITIBA

2015

MARCO ANTÔNIO BATISTA GUTERRES

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO POR METALURGIA DO
PÓ DE CUBO E DISCO DE EMBREAGEM MAGNÉTICA DE
COMPRESSOR DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO POR METALURGIA DO PÓ DE CUBO E DISCO DE EMBREAGEM MAGNÉTICA DE COMPRESSOR DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO", realizado pelo aluno MARCO ANTÔNIO BATISTA GUTERRES, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

UTFPR - Damec

Curitiba, 03 de Setembro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO POR METALURGIA DO PÓ DE CUBO E DISCO DE EMBREAGEM MAGNÉTICA DE COMPRESSOR DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO", realizado pelo aluno MARCO ANTÔNIO BATISTA GUTERRES, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Fábio Martins

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 17 de Setembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão deste trabalho, uma etapa importante em minha vida está sendo concluída, por isso agradeço a cada uma das pessoas que estiveram presentes neste período contribuindo com a minha realização.

Agradeço primeiramente ao meu orientador, professor Rodrigo Villanova, por todo o apoio, desde antes do início do estudo, quando havia apenas uma idéia, sempre me incentivando muito. Pelas reuniões com as discussões de como realizar o trabalho, além das conversas sobre diversos assuntos.

Agradeço aos professores da banca, professor Fábio Martins e professor Julio Neves, que aceitaram o convite com entusiasmo e colaboraram para que o trabalho tenha ficado com melhor qualidade.

Agradeço a toda a equipe da Engenharia de Projetos de Compressores da Denso do Brasil, colegas de trabalho excelentes que sempre contribuiram na troca de conhecimentos, especialmente ao nosso gerente, Mamoru Hanaoka, por toda a orientação na realização do trabalho.

Agradeço o apoio da MAHLE Metal Leve Miba Sinterizados Ltda, que através dos amigos engenheiros Alexandre Loureiro e Reginaldo Invernizzi, possibilitaram a realização do estudo contribuindo com informações e, principalmente, conhecimento.

Agradeço a minha família, que sempre esteve ao meu lado e, apesar da distância, foi fundamental para me motivar nos momentos difíceis, em especial minha mãe, Claudete Batista, que sempre fez tudo que foi possível para me auxiliar quando precisei.

Agradeço a todos os meus amigos, que estiveram presentes nos momentos de descontração durante esta cansativa jornada e também compartilharam conhecimentos que contribuiram com a realização do trabalho.

Por último, agradeço a pessoa que mais esteve presente neste período, nas madrugadas cansativas, minha namorada Georgia, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado me ajudando de diversas maneiras.

RESUMO

GUTERRES, Marco Antônio Batista. **Estudo de viabilidade de produção por metalurgia do pó de cubo e disco de embreagem magnética de compressor de ar condicionado automotivo**. 2015. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

O estudo objetivou determinar se há viabilidade técnica e econômica de produção de componentes mecânicos através do processo de metalurgia do pó. Os componentes mecânicos estudados foram o cubo e o disco de atrito, utilizados em embreagens magnéticas de compressores de ar condicionado automotivo. O trabalho analisou os esforços mecânicos aos quais os componentes são submetidos, a fim de determinar as propriedades que devem ser obtidas no processo de metalurgia do pó. Posteriormente, foi realizado o estudo para verificar a viabilidade do processo de metalurgia do pó em obter as peças com as propriedades desejadas. Após a conclusão do estudo do processo, foi realizada a análise de viabilidade econômica deste processo, fazendo a comparação dos custos de produção com os custos dos processos utilizados atualmente.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó. Cubo. Disco. Embreagem Magnética.

ABSTRACT

GUTERRES, Marco Antônio Batista. **Estudo de viabilidade de produção por metalurgia do pó de cubo e disco de embreagem magnética de compressor de ar condicionado automotivo**. 2015. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

The study aimed to determine whether there are technical and economic feasibility of production of mechanical components by powder metallurgy process. The mechanical components studied were the hub and the armature (friction disc), used in magnet clutches of automotive air conditioning compressors. This study analyzed the mechanical stresses to which the components are subjected in order to determine the properties to be obtained in the powder metallurgy process. Subsequently, the study was conducted to verify the feasibility of the powder metallurgy process to obtain parts with the desired properties. Upon the conclusion of the process study, it was carried out economic feasibility analysis of this process, making a comparison of production costs with costs of currently used processes.

Keywords: Powder Metallurgy. Hub. Armature. Magnet Clutch.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – COMPRESSOR DENSO 10P15 COM EMBREAGEM MAGNÉTICA ...	14
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DE EMBREAGEM MAGNÉTICA DENSO	15
FIGURA 3 – CUBO DA EMBREAGEM MAGNÉTICA	16
FIGURA 4 – DISCO DE ATRITO DA EMBREAGEM MAGNÉTICA	17
FIGURA 5 – AMOSTRAS RECEBIDAS PARA A USINAGEM DE PROTÓTIPOS DO CUBO	18
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE M/P	28
FIGURA 7 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE METALURGIA CONVENCIONAL E M/P RELACIONANDO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DENSIDADE	32
FIGURA 8 – SISTEMA DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO	37
FIGURA 9 – EMBREAGEM MAGNÉTICA	39
FIGURA 10 – MODIFICAÇÕES DE PROJETO DO CUBO	44
FIGURA 11 – A FIGURA “A” MOSTRA A COMPACTAÇÃO DE UMA PEÇA FLANGEADA UTILIZANDO-SE DOIS PUNÇÕES INFERIORES. A FIGURA “B” MOSTRA UMA MATRIZ DE ENCHIMENTO FIXO COM APENAS UM PUNÇÃO INFERIOR	45
FIGURA 12 – A FIGURA “A1” MOSTRA UM CHANFRO NÃO ADEQUADO AO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO, E A FIGURA “A2” A FALHA QUE OCORRE EM UM CHANFRO COMO ESTE. A FIGURA “B” APRESENTA AS RECOMENDAÇÕES A SEREM ADOTADAS, ONDE 30° É O VALOR IDEAL PARA α	46
FIGURA 13 – INSTRUÇÕES DO FORNECEDOR PARA GEOMETRIA DE CHANFROS DE COMPONENTES A SEREM PRODUZIDOS POR METALURGIA DO PÓ	47
FIGURA 14 – GEOMETRIA CONVENCIONAL DE METALURGIA DO PÓ PARA PEÇAS COM ESTRIADO INTERNO	48
FIGURA 15 – DENSIDADE DA PEÇA NA COMPACTAÇÃO DE SIMPLES AÇÃO ..	49
FIGURA 16 – SENTIDOS DE COMPACTAÇÃO E EXTRAÇÃO PARA O DISCO DE ATRITO	49
FIGURA 17 – MODIFICAÇÕES DE PROJETO DO DISCO	50
FIGURA 18 – TORQUE (T) E FORÇA TANGENCIAL (F_T) ATUANTES NO CUBO E RAIO MÉDIO (R_M) ONDE ATUA A FORÇA TANGENCIAL	55

FIGURA 19 – FORÇA TANGENCIAL (F_T) E FORÇA NORMAL (F_N) ATUANTES NO DENTE DO ESTRIADO DO CUBO E ÂNGULO DA FACE DO DENTE	56
FIGURA 20 – APLICAÇÃO DA FORÇA CORRESPONDENTE AO TORQUE NO CUBO.....	57
FIGURA 21 – APLICAÇÃO DE TORQUE NO DISCO	58
FIGURA 22 – SIMULAÇÃO DE TORQUE ESTÁTICO NO CUBO	60
FIGURA 23 – PARÂMETROS DE MALHA PARA SIMULAÇÃO DO CUBO	61
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM SIMULAÇÃO INICIAL NO CUBO	63
FIGURA 25 – RESULTADO DE SIMULAÇÃO COM TORQUE SUPOSTO PELO FORJADO.....	65
FIGURA 26 – SIMULAÇÃO DE TORQUE ESTÁTICO NO DISCO	66
FIGURA 27 – PARÂMETROS DE MALHA PARA SIMULAÇÃO DO DISCO	67
FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM SIMULAÇÃO INICIAL NO DISCO	68
FIGURA 29 – PARÂMETROS DE MALHA PARA SIMULAÇÃO DO DISCO, ALTERANDO ENGASTE E CARREGAMENTO	69
FIGURA 30 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM SIMULAÇÃO NO DISCO.....	70
FIGURA 31 – SIMULAÇÃO ESTÁTICA BASE PARA SIMULAÇÃO DE FADIGA DO CUBO.....	71
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO DE VIDA EM FADIGA DO CUBO	72
FIGURA 33 – SIMULAÇÃO ESTÁTICA BASE PARA SIMULAÇÃO DE FADIGA DO DISCO.....	73
FIGURA 34 – SIMULAÇÃO DE VIDA EM FADIGA DO DISCO	74
FIGURA 35 – APLICAÇÃO DA CARGA DE REBITAGEM NO CUBO	75
FIGURA 36 – APLICAÇÃO DA CARGA DE REBITAGEM NO DISCO	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CÁLCULO DE DENSIDADE A PARTIR DE AMOSTRAS CILÍNDRICAS PARA USINAGEM DE PROTÓTIPOS DO CUBO	19
TABELA 2 – PESO MÉDIO (KG) POR VEÍCULO DE PEÇAS SINTERIZADAS.....	26
TABELA 3 – CÁLCULO DO NÚMERO DE CICLOS PARA VIDA EM FADIGA.....	54
TABELA 4 – TABELA DE CONVERSÃO DE ESCALAS DE DUREZA.....	62
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO DE LIGAS DE FERRO SINTERIZADAS PARA COMPONENTES MECÂNICOS	77
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS DE FERRO E AÇO SINTERIZADO.....	78
TABELA 7 – ORÇAMENTOS DOS COMPONENTES.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A/C – Ar Condicionado (Air Conditioning)

SAE – Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto do Tema	17
1.2	Caracterização do Problema	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	Justificativa	21
1.5	Conteúdo ou Etapas do Trabalho	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	A Metalurgia do Pó – Histórico	24
2.2	A Metalurgia do Pó – Atualidade e Perspectiva	24
2.3	A Metalurgia do Pó na Indústria Automotiva	25
2.4	A Metalurgia do Pó – Definições do Processo	27
2.5	Compactação	29
2.6	Sinterização	29
2.7	Operações Complementares	30
2.8	Propriedades Mecânicas	31
2.9	Controle de Qualidade	32
2.10	Projeto de Peças Sinterizadas	33
2.11	Ferro e Aço Sinterizados	34
2.12	Sinterizado Forjado	34
2.13	Forjamento	36
2.14	Estampagem	36
2.15	Compressores de Ar Condicionado	37
2.16	Compressores de Ar Condicionado Automotivos	38
2.17	Embreagem Magnética	38
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
3.1	Determinação dos Carregamentos Mecânicos	40
3.2	Determinação dos Esforços Mecânicos e Propriedades Mecânicas	40
3.3	Processo de Metalurgia do Pó	41
4	Processo de produção por metalurgia do pó	42
4.1	Etapas do Processo	42
4.1.1	Compactação	42
4.1.2	Sinterização	42
4.1.3	Operações Posteriores	43
5	Projeto dos componentes	44
5.1	Cubo	44
5.2	Disco	48
6	Resultados	52
6.1	Determinação dos Carregamentos Mecânicos	52

6.1.1	Carregamento Estático de Torque	52
6.1.2	Carregamento Dinâmico de Torque	52
6.1.3	Carregamento de Rebitagem	54
6.2	Determinação dos Esforços Mecânicos	55
6.2.1	Esforços resultantes do torque estático	55
6.2.2	Esforços resultantes do torque dinâmico	58
6.2.3	Esforços resultantes da carga de rebitagem	59
6.3	Determinação das Propriedades Mecânicas	59
6.3.1	Tensão de escoamento dos componentes	59
6.3.2	Resistência à Fadiga	70
6.3.3	Resistência a compressão	74
6.3.4	Dureza	76
6.4	Análise de Viabilidade Técnica	76
6.5	Determinação do Método e Parâmetros do Processo de Metalurgia do Pó	79
6.6	Orçamento do Processo de Metalurgia do Pó	79
6.7	Análise de Viabilidade Econômica	81
7	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Os componentes mecânicos em estudo são utilizados nas embreagens magnéticas de compressores para ar condicionado automotivos produzidos pela empresa Denso do Brasil LTDA. A Denso produz, em sua planta localizada em Curitiba-PR, compressores do tipo pistão fixo de dupla ação, sendo a única empresa a produzir este tipo de produto no Brasil. A figura 1 mostra um compressor com embreagem magnética Denso.

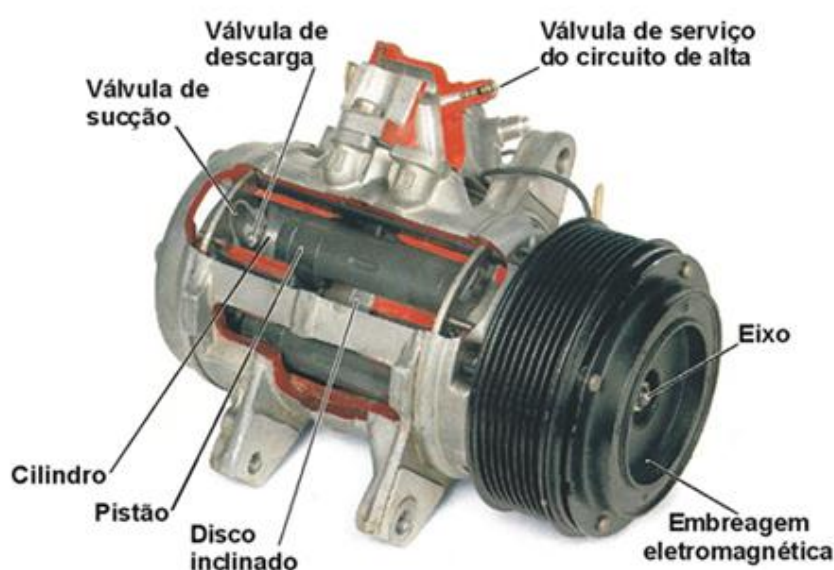


Figura 1: Compressor Denso 10P15 com Embreagem Magnética

Fonte: <http://www.vwcaminhoeseonibus.com.br>

A embreagem magnética dos compressores de ar condicionado é responsável por fazer o acoplamento e desacoplamento do compressor com a correia de componentes periféricos do motor de um veículo, conforme a demanda do sistema de ar condicionado. Uma embreagem magnética é dividida em três partes principais, que são sub-montagens do produto final. Estas três partes são:

- Estator Sub-Assy: Sub-montagem que possui a bobina que cria o campo magnético que proporciona o acoplamento da embreagem.
- Rotor Sub-Assy: Componente que possui a polia que está conectada a correia de periféricos do motor do veículo, e que realiza movimento de rotação sempre que

o motor do veículo está em funcionamento. No rotor também há uma face de atrito para transmitir torque quando a embreagem está acionada.

- Cubo Sub-Assy: Parte que sofre o efeito do campo magnético de acionamento da embreagem, transmitindo o movimento do rotor ao eixo do compressor. Nesta sub-montagem que estão incluídos os dois componentes estudados neste trabalho, o disco de atrito e o cubo.

A figura 2 mostra uma embreagem magnética Denso e seus componentes, destacando os componentes em estudo.

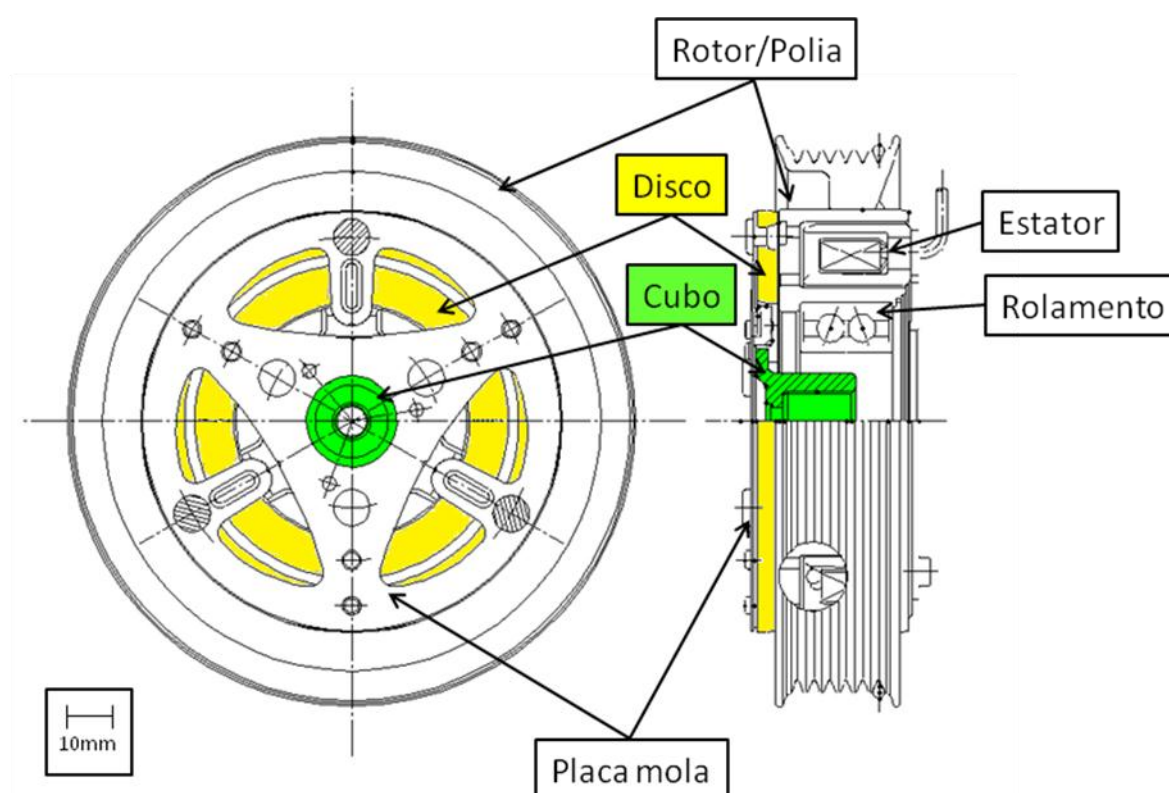


Figura 2: Ilustração de Embreagem Magnética Denso

Fonte: Arquivo Pessoal

O primeiro componente em estudo é o cubo da embreagem magnética, cuja função é transmitir o torque da embreagem magnética, quando a mesma está acionada, para o eixo do compressor. O cubo é fixado à placa mola através de rebites e ao eixo do compressor através de um acoplamento estriado. Atualmente o cubo é produzido pelo processo de forjamento a frio, combinado com estampagem, não sendo necessária operação alguma após este processo. O material utilizado no

componente é o aço JIS S10C, equivalente ao SAE 1010. A figura 3 mostra o cubo da embreagem magnética Denso.

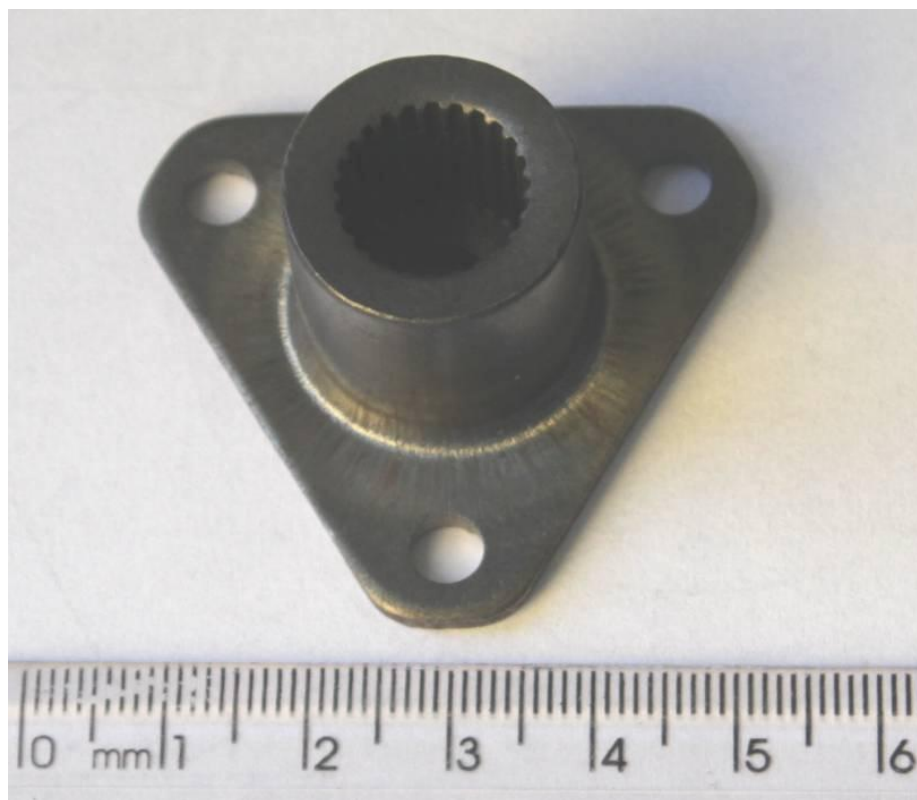


Figura 3: Cubo da Embreagem Magnética

Fonte: Autoria Própria

O segundo componente em estudo é o disco de atrito da embreagem magnética, cuja função é receber a transmissão de torque do rotor através da face de atrito. Quando a embreagem magnética está acionada, o disco é atraído contra a face de atrito do rotor, e assim o torque é transmitido através do atrito entre as faces do rotor e do disco. O disco é fixado à placa mola através de rebites. Atualmente o disco é produzido pelo processo de estampagem, não sendo necessária operação alguma após a estampagem. O material utilizado no componente é o JIS DSPHC-P, equivalente ao SAE 1008. A figura 4 mostra o disco de atrito da embreagem magnética Denso.

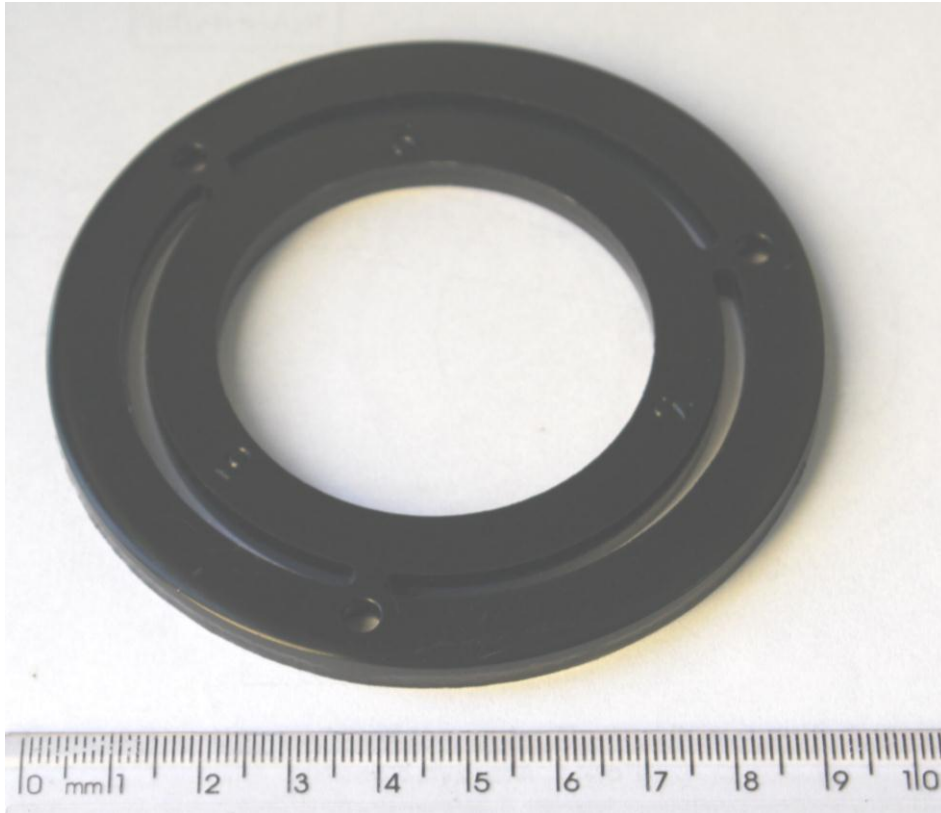


Figura 4: Disco de Atrito da Embreagem Magnética

Fonte: Autoria Própria

1.1 Contexto do Tema

A fabricação dos componentes mecânicos em estudo através da metalurgia do pó pode proporcionar vantagens econômicas significativas através da redução dos custos de produção.

Segundo Pallini (2006), avanços recentes nos campos dos materiais e processos relacionados à metalurgia do pó permitem o projeto e fabricação de peças com alta resistência e elevada precisão dimensional, assim esta tecnologia de fabricação é uma opção cada vez mais comum para as engenharias de produto das indústrias automotivas.

Porém, até então foi encontrada grande dificuldade técnica para realizar a mudança no processo, pois na metalurgia do pó podem ocorrer significativas variações nas propriedades mecânicas dos produtos conforme os ajustes de processo adotados, e assim exige uma avaliação muito mais detalhada do

funcionamento dos componentes e do processo de fabricação. Em estudos de redução de custo realizados na Denso no ano de 2012, preocupou-se apenas em cumprir o dimensional especificado em desenho, e em se reduzir o custo o máximo possível. Na finalização do estudo realizado com pouco embasamento técnico, após cotação com fornecedor, foram enviadas amostras com forma cilíndrica, mostradas na figura 5, para a usinagem de protótipos do cubo. A usinagem dos protótipos foi cancelada e o trabalho acabou apenas com os orçamentos.



Figura 5: Amostras recebidas para a usinagem de protótipos do cubo

Fonte: Arquivo Pessoal

Em um trabalho acadêmico, realizado pelo autor, na disciplina optativa de Metalurgia do Pó, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da UTFPR, no ano de 2013, foi analisada a possibilidade de utilizar estas amostras para a produção de protótipos. O cálculo da densidade das amostras mostrou que as amostras foram produzidas com uma densidade baixa, $6,56\text{g/cm}^3$, ou 84% de densidade relativa, mostrando que o orçamento com baixo custo possivelmente não atenderia os requisitos mecânicos da peça. A tabela 1 mostra o cálculo da densidade a partir das amostras cilíndricas, onde foram realizadas três medições de diâmetro, representadas por $\varnothing 1$, $\varnothing 2$ e $\varnothing 3$, e três medições de comprimento do cilindro, representadas por L1, L2 e L3.

Tabela 1: Cálculo de densidade a partir de amostras cilíndricas para usinagem de protótipos do cubo

Amostras Aço Sinterizado											
Amostra	Ø1	Ø2	Ø3	Média	L1	L2	L3	Média	Volume (cm ³)	Massa (g)	ρ (g/cm ³)
1	50.45	50.52	50.42	50.46	22.12	22.26	22.28	22.22	44.42	290.4	6.54
2	50.46	50.48	50.42	50.45	22.26	22.20	22.36	22.27	44.51	290.8	6.53
3	50.46	50.48	50.46	50.47	21.89	21.96	22.02	21.96	43.90	286.8	6.53
4	50.44	50.44	50.46	50.45	22.14	22.10	22.28	22.17	44.30	290.8	6.56
5	50.50	50.46	50.42	50.46	22.02	22.06	22.14	22.07	44.12	289.4	6.56
6	50.50	50.46	50.44	50.47	22.12	22.12	22.16	22.13	44.25	290.3	6.56
7	50.46	50.44	50.44	50.45	22.20	22.14	22.24	22.19	44.34	290.6	6.55
8	50.44	50.44	50.46	50.45	21.92	21.90	21.92	21.91	43.78	288.1	6.58
9	50.45	50.42	50.44	50.44	22.14	22.20	22.10	22.15	44.23	290.4	6.57
10	50.44	50.44	50.48	50.45	22.10	22.16	22.10	22.12	44.20	290.4	6.57
Dimensões em mm										Média	6.56

Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com Pallini (2006), devido à competitividade no mercado global, a velocidade de lançamento e/ou atualização de produtos aumenta constantemente para suprir as expectativas dos clientes por produtos tecnologicamente atualizados, com qualidade e preços competitivos. Neste cenário, os departamentos de engenharia acabam escolhendo opções de processo mais comuns, como fundição, usinagem, forjamento, e nem sempre a metalurgia do pó é considerada como opção. Além disso, departamentos de compras das montadoras ou sistemistas, visando reduzir custos, fazem a opção pela metalurgia do pó quando o projeto do componente já foi definido e projetado para outro método de manufatura. O conhecimento das características da metalurgia do pó pode ser decisivo para o sucesso do projeto, isto é, obter um componente que atenda os requisitos técnicos da aplicação, com redução de custos.

Para realizar um estudo que apresentasse resultados consistentes, foi realizado todo o estudo de projeto mecânico, determinando e avaliando os esforços aos quais os componentes são submetidos, na fabricação e na aplicação, a fim de determinar as propriedades necessárias para que não haja problemas de resistência.

Como são diversas as alternativas de uso do sinterizado, o projetista necessita especificar com clareza as propriedades inerentes ao projeto, priorizando-as

adequadamente, levando em conta a interdependência entre algumas das propriedades, de modo a aprimorar a relação custo/benefício final (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Determinadas as propriedades dos materiais das peças, foi realizado o estudo de operações fundamentais e complementares da metalurgia do pó para determinar como deverá ser realizado o processo para que as peças sejam obtidas com as propriedades desejadas. Após o estudo do processo para que as peças atendam os requisitos de projeto, foi realizado o estudo de viabilidade econômica deste processo para determinar a viabilidade de implantação da produção dos componentes através do processo de metalurgia do pó.

1.2 Caracterização do Problema

O problema tratado neste trabalho trata-se da oportunidade de alteração do processo de fabricação dos componentes em estudo pelo processo de metalurgia do pó, que pode se mostrar um processo vantajoso. Nos processos industriais, especialmente na indústria automobilística, a busca por alternativas que reduzam os custos de produção dos componentes é contínua, por isso todas as inovações que possam promover atividades de redução de custo devem ser analisadas.

A oportunidade de redução de custo com a mudança do processo de fabricação dos componentes em estudo para metalurgia do pó se deve a duas características das peças, alto volume de produção e geometria favorável.

Há limitações para a técnica de metalurgia do pó, uma das quais é exatamente a quantidade de peças a serem produzidas, para que o processo seja competitivo com as técnicas convencionais. Outra limitação importante está relacionada com as dimensões das peças a serem produzidas (CHIAVERINI, 2001).

A embreagem magnética que utiliza os componentes em estudo, pode ser aplicada a diversos modelos de compressores, sendo que cada modelo de compressor pode ser aplicado a diversos modelos de veículos. Com isso, o volume de produção dos componentes pode superar os volumes dos veículos mais populares em produção.

Contudo, é essencial que as quantidades a serem produzidas na maioria dos casos sejam grandes, dado o elevado custo do ferramental empregado – matrizes e componentes de compactação (CHIAVERINI, 2001).

Os componentes em estudo apresentam formas geométricas favoráveis para um processo de metalurgia do pó de baixo custo, pois são peças com geometria para trabalho com movimento de rotação, sem apresentar detalhes complexos, além de não possuírem grandes dimensões.

É importante destacar que a tecnologia da metalurgia do pó, a menos em aplicações muito específicas quando os materiais não podem ser obtidos através de outros processos de fabricação, deve ser considerada como alternativa e considerações de ordem econômica devem ser cuidadosamente analisadas (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho consiste em determinar a viabilidade de produção, técnica e econômica, dos componentes mecânicos em estudo através do processo de metalurgia do pó, com o desejo de obtenção de redução de custos de fabricação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos do trabalho, temos:

- Determinar a resistência mecânica que os componentes necessitam para suportar os esforços mecânicos aos quais são submetidos.
- Determinar parâmetros e etapas do processo de metalurgia do pó para que a produção dos componentes atenda os requisitos de resistência mecânica.
- Determinar o custo de produção dos componentes pelo processo definido neste trabalho.

1.4 Justificativa

A oportunidade de viabilização da produção por metalurgia do pó dos componentes em estudo foi estudada com o fim de proporcionar redução de custo

dos processos de fabricação dos componentes mecânicos, e este projeto de pesquisa se mostrou necessário para uma análise detalhada da possibilidade de implantação desta mudança.

Reduções de custos de componentes automotivos podem ser obtidos através da metalurgia do pó, desde que o engenheiro de produto envolva os possíveis fornecedores e especialistas no início de um novo projeto. Isto deve ocorrer para que os requisitos de resistência mecânica sejam adequadamente selecionados, evitando-se exageros que agregam custos ao produto ao invés de valor (PALLINI, 2006).

Dados obtidos em análises de redução de custo realizado na Denso para os componentes em estudo mostraram que poderia haver possibilidade de ser viável financeiramente a implantação do projeto. Para o cubo, o custo da produção por metalurgia do pó orçado anteriormente foi de R\$1,20, enquanto que o custo atual do forjado a frio é de R\$1,90. Para o disco, o custo orçado de produção por metalurgia do pó foi de R\$1,84, enquanto que o custo atual do estampado é de R\$2,10. Todos os valores mencionados não incluem impostos, a serem aplicados sobre estes valores. Somando os dois componentes, a redução de custo poderia ficar em torno de R\$1,00 por unidade do produto, que tem um potencial de mercado que pode atingir a produção de 1 milhão de unidades por ano, sendo assim, o estudo poderia proporcionar uma redução de custo em torno de R\$1.000.000,00 (um milhão de reais) por ano. Vale lembrar que os orçamentos de produção por metalurgia do pó realizados anteriormente tiveram pouco embasamento técnico, e por isso não foram viabilizados. O estudo de viabilidade técnica foi detalhadamente realizado neste trabalho e modificou os valores das cotações, porém estes orçamentos foram válidos para demonstrar um possível potencial de viabilidade econômica deste projeto de pesquisa.

Este projeto envolveu um estudo de engenharia completo, sendo necessários sólidos conhecimentos nas áreas de projeto, mecânica estrutural, materiais, processos de fabricação e análise de custos.

O conhecimento adquirido no desenvolvimento do estudo foi de grande valia ao autor, e com certeza contribuirá em seu desenvolvimento profissional.

1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho

Para a realização do trabalho foi necessário adquirir o embasamento técnico para realizar a análise da possibilidade de mudar o processo de fabricação dos componentes, sem comprometer suas funcionalidades e com custo competitivo. Assim, foi realizada uma fundamentação teórica que contemplasse os conhecimentos a respeito do processo de metalurgia do pó importantes a se considerar no projeto dos componentes, para tornar possível a fabricação atendendo os requisitos de projeto e as necessidades do processo de fabricação.

Para determinar os requisitos de projeto a serem satisfeitos pelo processo de fabricação, foram determinados os carregamentos aos quais os componentes são submetidos, os respectivos esforços a serem suportados pelos componentes, e, por fim, as propriedades mecânicas que os componentes devem possuir para resistir a estes esforços.

Com o objetivo de favorecer o processo de produção por metalurgia do pó, a fim de torná-lo competitivo economicamente, foram levantadas as alterações de projeto viáveis de serem realizadas na geometria dos componentes contribuindo com a etapa de compactação do pó.

A partir dos requisitos e melhorias do projeto para adequação ao novo processo, foi realizado o estudo da proposta do processo de fabricação, com o orçamento do custo dos componentes para análise de viabilidade econômica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Metalurgia do Pó – Histórico

A expansão na fabricação de componentes mecânicos utilizando pó de ferro por metalurgia do pó ocorreu somente na década de 1930 e principalmente após a Segunda Guerra Mundial. Antes deste período, a metalurgia do pó não estava suficientemente desenvolvida sob o ponto de vista técnico para competir economicamente com os processos convencionais, além do fato de que os especialistas na época estavam mais interessados em aplicar a técnica naqueles setores onde a metalurgia do pó era praticamente a única solução. As indústrias mecânica e automobilística, principalmente esta última, foram as grandes responsáveis pela utilização crescente de peças sinterizadas de ferro e suas ligas, a ponto de, em diversos casos, a mesma ter-se tornado insubstituível, principalmente sob o ponto de vista de custos o que, evidentemente, constitui na indústria moderna, fator de fundamental importância na escolha de determinado método de fabricação (CHIAVERINI, 2001).

A metalurgia do pó, atualmente, é um processo de fabricação de peças e componentes totalmente consolidado. Em um século, saiu do patamar de técnica incipiente e experimental para conquistar a posição atual de destaque, sendo considerada altamente avançada, econômica e ecológica (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

No Brasil, existe um histórico de empresas familiares que começaram intensos trabalhos em metalurgia do pó a mais de 50 anos e que ainda hoje estão em plena atividade, crescendo e investindo. Algumas destas empresas pioneiras são hoje parte de grupos multinacionais e outras ainda permanecem familiares, além das mais novas que nasceram por aqui e das que vieram como filiais de multinacionais. São empresas de porte grande, médio e pequeno (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

2.2 A Metalurgia do Pó – Atualidade e Perspectiva

Com o constante aperfeiçoamento da técnica de consolidação dos pós, ou seja, da compactação e da sinterização, da aplicação da técnica de infiltração

metálica e de outras técnicas de conformação, como forjamento-sinterização, além das inovações constantes na produção de pós, de maneira a resultarem pós com características distintas de compactação, foi possível tornar a metalurgia do pó uma técnica competitiva com os processos metalúrgicos tradicionais, não somente sob o ponto de vista econômico, como também pelo fato de obter no produto final, propriedades mecânicas comparáveis com às dos materiais fundidos, conformados mecanicamente ou usinados, Assim como as operações de tratamento térmico e tratamento superficial podem ser aplicadas com êxito e relativa facilidade (CHIAVERINI, 2001).

As áreas de aplicação da técnica estão distribuídas por todos os setores industriais, visto que os produtos da metalurgia do pó são essenciais em alguns casos e em outros apresentam claras vantagens de aplicação, especialmente de ordem econômica, em relação aos outros processos de fabricação (CHIAVERINI, 1986).

Está se tornando comum a substituição de processos tais como fundição sob pressão, forjamento, fundição de precisão, estampagem, usinagem e outros, pela técnica de metalurgia do pó. O alto volume de produção das peças, de formas complexas, com forma definitiva ou próxima da definitiva, com tolerâncias apertadas, combinada com a eliminação de operações de acabamento e, portanto, com economia de matérias-primas, tempo e energia, tem levado a essa tendência (CHIAVERINI, 2001).

Sem sombra de dúvidas a metalurgia do pó acompanhará o crescimento e desenvolvimento de componentes que trabalham em sistemas estáticos e dinâmicos de alta solicitação mecânica, aliando também resistência ao desgaste, como também resistência à corrosão. Estão ocorrendo avanços na área de materiais e processos que tornam a metalurgia do pó altamente competitiva em relação a outros processos de manufatura (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

2.3 A Metalurgia do Pó na Indústria Automotiva

A utilização de pós na indústria de modo geral não está restrita à produção de componentes. No entanto, a maior quantidade de pós metálicos ferrosos e não ferrosos são utilizados na fabricação de peças que tem como maior usuário a

indústria automotiva e de motocicletas (aproximadamente 75% do total). E o Brasil apresenta um enorme potencial de crescimento, quando se compara o consumo médio de sinterizado por automóvel produzido nos EUA, Europa e Japão com aqueles produzidos em nosso país. A tabela 2 apresenta a evolução deste indicador para cada região ao longo do tempo (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Tabela 2 - Peso médio (kg) por veículo de peças sinterizadas

	1988	1998	2008	Tendência a curto e médio prazo	Tendência a longo prazo
América do Norte	6,8	14,8	19,5	Redução	Redução (automóveis com motores menores e transmissões reduzidas)
Europa	3,5	7,8	9,3	Estável	Estável
Japão	4,7	6,6	8,6	Estável	Estável
Brasil	2,5	3,5	5,1	Aumento	Estável

Obs.: 230 aplicações diferentes em um total de 750 peças.

Fonte: (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009)

Conforme mostrado na tabela acima, a indústria automobilística da América do Norte é a que mais aplica componentes produzidos por metalurgia do pó em veículos, porém as tendências a curto, médio e longo prazo são de redução na aplicação. As indústrias europeias e japonesas utilizam uma quantidade menor que na América do Norte e tendem a manter esta aplicação estável. Por sua vez, o Brasil aplica menos componentes sinterizados, com uma tendência de aumento a curto prazo para atingir níveis semelhantes aos da Europa e Japão, sendo assim, a indústria brasileira apresenta um bom potencial de expansão da tecnologia de metalurgia do pó.

De acordo com Pease (2002), em 2000 a média dos carros dos E.U.A. teve mais que 17,0kg de peças de metalurgia do pó e alguns SUV's e caminhões leves tiveram 27,2kg.

2.4 A Metalurgia do Pó – Definições do Processo

A metalurgia do pó é a técnica metalúrgica que consiste em transformar pós de metais, metalóides ou ligas metálicas e, às vezes, também substâncias não-metálicas, em peças resistentes, sem recorrer-se à fusão, mas apenas pelo emprego de pressão e calor (CHIAVERINI, 1986).

A compactação e a sinterização são as duas operações básicas, podendo sofrer na prática algumas modificações, sobretudo no que se refere à compactação. Outras operações típicas da metalurgia do pó consistem na mistura dos pós, antes da compactação, quando se trata de vários componentes, e na calibração ou calibragem, após a sinterização. Além dessas, podem ser realizadas outras operações, tais como, por exemplo, tratamentos térmicos, tratamentos superficiais, além da usinagem (CHIAVERINI, 2001).

A figura 6 mostra o fluxograma do processo de metalurgia do pó, mostrando todas as etapas, obrigatórias ou opcionais, que podem ser realizadas. Estas variações nas etapas, principalmente a necessidade de operações complementares, serão avaliadas neste estudo.

METALURGIA DO PÓ – Fluxograma do Processo

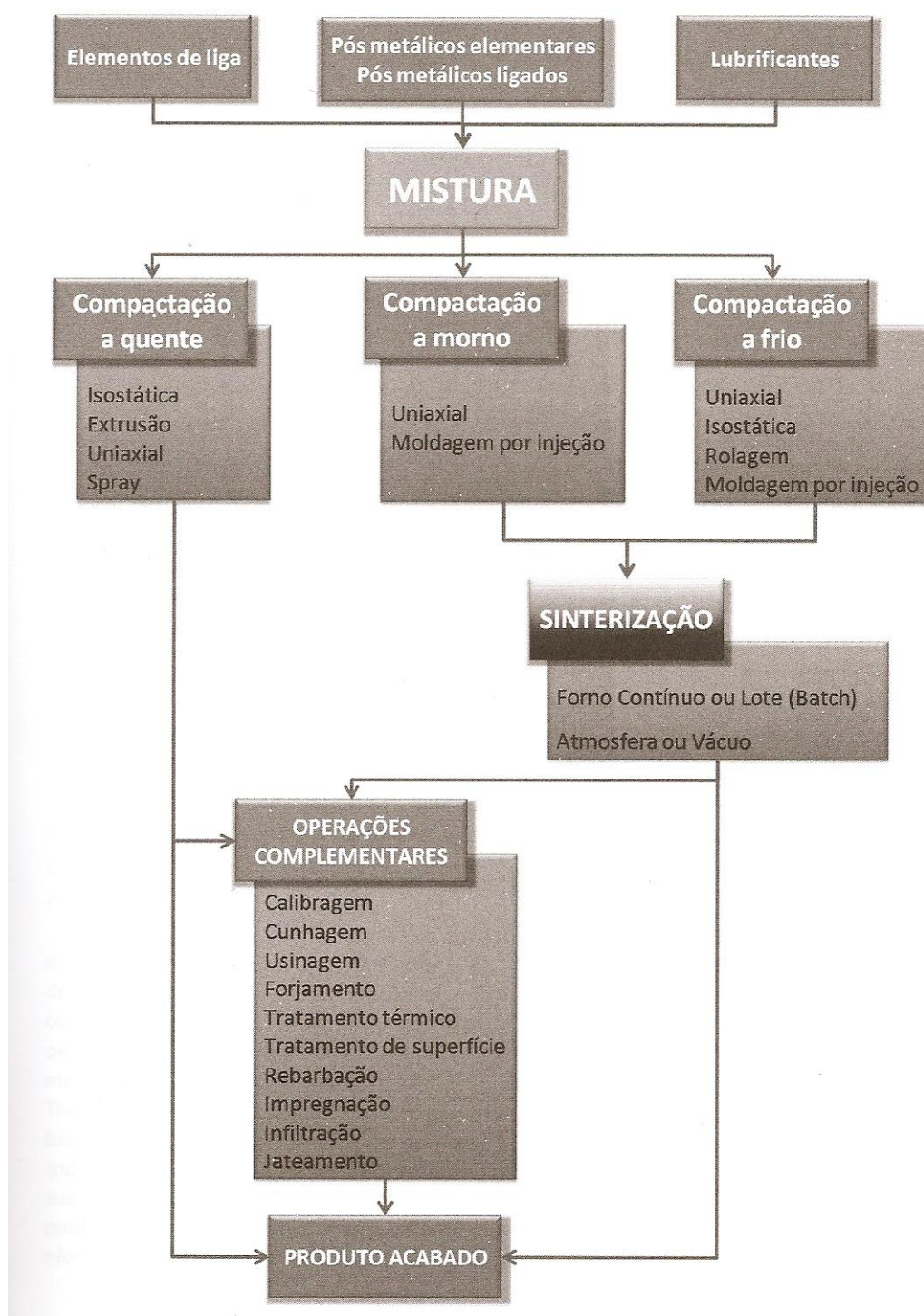


Figura 6: Fluxograma do Processo de Metalurgia do Pó.

Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

2.5 Compactação

É a etapa do processo em que o pó é prensado no formato desejado, sendo uma etapa crítica no processo de fabricação da peça, em que é iniciado o ciclo de consolidação dos pós metálicos. Uma compactação mal feita pode levar a uma peça com variações excessivas de densidade que podem comprometer o desempenho do produto final (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

De qualquer modo, a aplicação de pressão num amontoado de pó metálico localizado no interior da cavidade de uma matriz produz um compactado, o qual, na maioria dos casos, possui densidade e resistência mecânica suficientes para permitir seu manuseio posterior com certa facilidade (CHIAVERINI, 2001).

Considerando a geometria dos componentes em estudo, que é uma geometria simples de compactar, será analisado apenas um tipo de compactação, a mais comum, que é a compactação unidirecional em matriz rígida, pois este tipo de compactação é mais simples e conseqüentemente apresenta menor custo.

Pesquisadores têm procurado estabelecer fórmulas matemáticas relacionando pressão e densidade ou porosidade. Sabe-se que ao aumentar-se a pressão, a densidade da massa de pó aumenta e a porosidade diminui. Contudo, a distribuição da pressão aplicada na massa de pó, contida em matriz rígida, não é uniforme (CHIAVERINI, 2001).

2.6 Sinterização

A sinterização é a operação fundamental da técnica de metalurgia do pó, porque ela constitui a fase final do ciclo de consolidação dos pós metálicos, ciclo esse iniciado com a compactação (CHIAVERINI, 2001).

Do ponto de vista da metalurgia do pó define-se sinterização como o processo pelo qual agregados de pós compactados ou não, são transformados em corpos sólidos por mecanismo de transporte atômico difusionais a temperaturas abaixo do ponto de fusão do constituinte principal. Durante o processo ocorre a redução de energia livre do sistema através da diminuição da superfície específica do material. Resulta daí a formação de contornos de grãos e crescimento de pescoço entre

partículas, levando o sistema à densificação e conseqüentemente à contração volumétrica (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Normalmente, a temperatura especificada de sinterização é da ordem 2/3 a 3/4 da temperatura solidus da liga considerada. Por exemplo, no caso do ferro, a temperatura de sinterização varia de 1000°C a 1200°C, sendo, para os casos mais comuns, de 1100°C (CHIAVERINI, 2001).

Com o aumento da temperatura, ocorre a contração dos poros, acompanhada da diminuição do volume da peça e aumento das suas propriedades mecânicas; este estágio praticamente determina as propriedades do sinterizado (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

A sinterização consiste no aquecimento dos compactados verdes, que são as peças obtidas na operação de compactação apenas pelo agrupamento e compressão dos pós na forma desejada, a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada, sob condições controladas de tempo, temperatura e meio ambiente. Como resultado, as partículas que constituem o compactado ligam-se entre si e o material adquire as características desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica (CHIAVERINI, 2001).

Em resumo a sinterização é um processo relativamente simples que, no entanto exige controle rigoroso das variáveis que podem afetar a formação da liga. A variável mais importante do processo é a temperatura, pois o grau de ligação das partículas aumenta consideravelmente com pequenos aumentos da temperatura de sinterização. A segunda variável mais importante é o tempo de sinterização, pois, quanto mais longo, maior o grau de ligação devido à maior quantidade de material difundido. A atmosfera do forno é outra importante variável e sua função básica é proteger o material da ação do oxigênio (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

2.7 Operações Complementares

Embora a metalurgia do pó seja tratada como um processo “*net shape*” ou “*near net shape*” (próximo da forma final), algumas aplicações específicas requerem características especiais somente atingidas através de operações posteriores.

Dentre estas podemos citar tolerâncias dimensionais estreitas, alta dureza e/ou resistência mecânica, estanqueidade a gases ou líquidos, resistência à corrosão e aparência (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

De um modo geral, podem ser consideradas dez operações secundárias ou complementares: recompressão, calibragem, cunhagem, impregnação, infiltração, usinagem, tratamento térmico, tratamento superficial, soldagem e tamboreamento (CHIAVERINI, 2001).

2.8 Propriedades Mecânicas

De acordo com Chiaverini (1986), as propriedades mecânicas constituem os característicos mais importantes dos metais para sua aplicação no campo da engenharia, visto que o projeto e a execução das estruturas metálicas, assim como a confecção dos componentes mecânicos são baseados no seu conhecimento.

As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos e correspondem às propriedades que, num determinado material, determinam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que se verifiquem deformações incontroláveis (CHIAVERINI, 1986).

Nas peças sinterizadas, o primeiro fator a influenciar as propriedades mecânicas é, como seria de esperar, a composição química do material. Outros fatores, contudo, exercem grande influência: densidade, tamanho de partícula do pó da mistura, dimensões dos poros, forma e distribuição de tamanho de partícula. Por essa razão, as propriedades mecânicas – tais como limite de resistência à tração ou limite de escoamento – são apresentadas em gráficos relacionando estas características com outras, por exemplo, a densidade (CHIAVERINI, 2001).

A variação do limite de resistência à tração em função da densidade para diversos aços está representada no gráfico da figura 7.

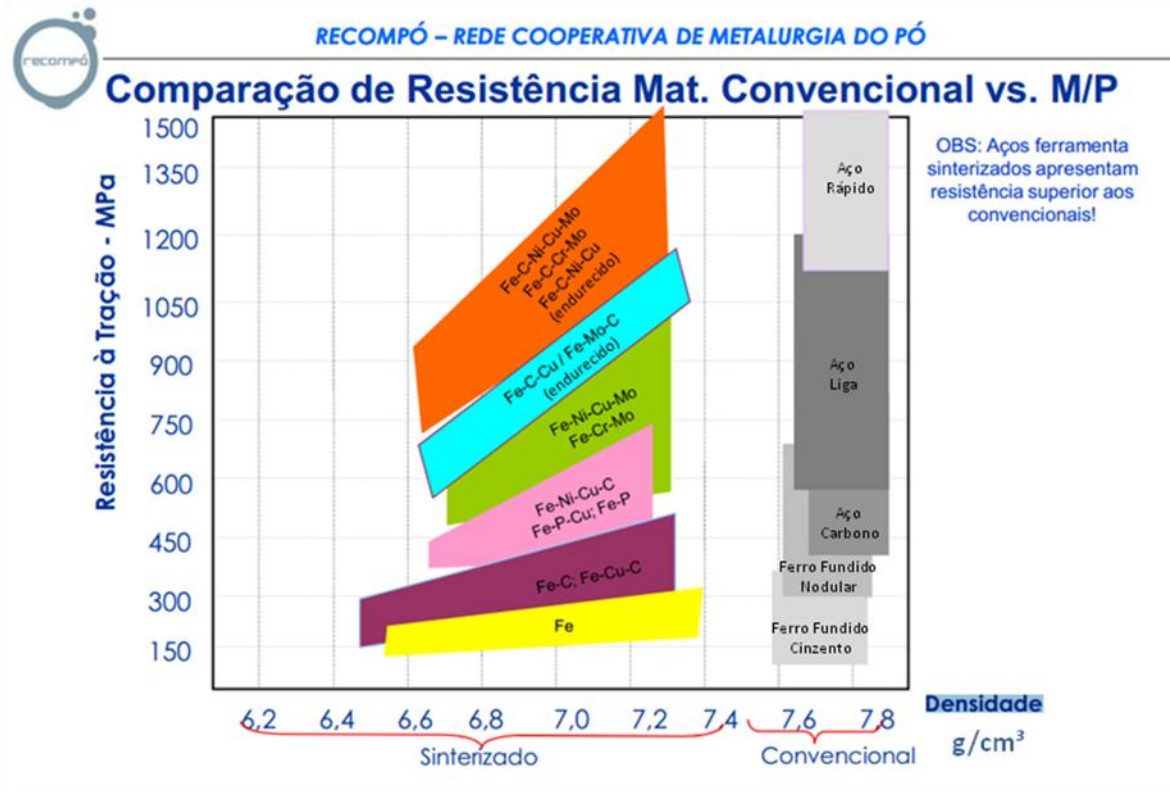


Figura 7: Gráfico comparativo entre Metalurgia Convencional e Metalurgia do Pó relacionando Resistência à Tração e Densidade.

Fonte: Recompó (www.recompo.com.br).

Diferentemente de materiais obtidos por outros processos de fabricação, as propriedades mecânicas do sinterizado são altamente dependentes da densidade e em menor grau do tamanho, forma e distribuição das partículas dos pós utilizados. Por esta razão, as propriedades mecânicas do sinterizado, principalmente aquelas relacionadas a aplicações dinâmicas devem ser sempre avaliadas em função da densidade com que o componente será fabricado (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

2.9 Controle de Qualidade

Os sistemas de garantia da qualidade amplamente difundidos no setor automotivo têm sua aplicação plena na indústria da metalurgia do pó. As exigências normativas universais como ISO 9000, ou exclusivas das montadoras de automóveis, a norma ISO/TS, encontram nestes mercados aplicação para cada um de seus requisitos (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

A prática da sinterização é um processo relativamente simples, desde que se disponha de equipamento adequado – fornos, atmosferas protetoras e instrumentos de medição e controle. Contudo, ela depende de uma série de fatores que afetam os resultados finais e, portanto, tornam a operação de sinterização uma operação delicada e que exige um rigoroso conhecimento e controle de todas as variáveis que podem influenciá-las. Essas variáveis são, entre outras, a natureza do pó, a natureza da mistura de pós, os característicos dos compactados verdes obtidos na primeira fase de consolidação, tais como porosidade, densidade e resistência verde (resistência do compactado verde antes da sinterização), etc. (CHIAVERINI, 2001).

A inspeção e o controle de qualidade das peças sinterizadas são tão importantes, senão mais, quanto nos produtos metalúrgicos obtidos pelos processos convencionais. Considerando os característicos de precisão dimensional das peças sinterizadas, assim como sua porosidade, a determinação de certas propriedades, como densidade e dureza, embora feitas pelos métodos convencionais, exige cuidados e técnicas que permitam uma avaliação confiável desses característicos (CHIAVERINI, 2001).

A influência da densidade nas outras propriedades de produtos sinterizados é muito grande, de modo que sua determinação constitui um dos itens mais importantes do controle de qualidade (CHIAVERINI, 2001).

2.10 Projeto de Peças Sinterizadas

É, portanto, de toda conveniência que exista um diálogo constante entre os encarregados do projeto e desenho das peças e os encarregados de sua fabricação, porque estes últimos conhecem melhor as restrições da operação de compactação e o comportamento do material durante a sinterização (CHIAVERINI, 2001).

Em resumo, a forma das peças e suas peculiaridades de desenho são pontos importantes a serem considerados no seu projeto. Não é aconselhável, em face de um determinado desenho que se tem em mãos, resolver simplesmente adotar o processo de metalurgia do pó por ser considerado mais econômico para produzir aquela determinada peça, sem proceder-se a criterioso exame das dificuldades que podem ser enfrentadas, sem que alguma modificação seja introduzida (CHIAVERINI, 2001).

É, pois, conveniente, que, em alguns casos, se realizem pequenas alterações no projeto, desde que elas não modifiquem a função específica da peça. Desse modo serão aproveitadas todas as vantagens típicas da metalurgia do pó (CHIAVERINI, 2001).

2.11 Ferro e Aço Sinterizados

Segundo Chiaverini (1986), a fabricação de peças sinterizadas de ferro e aço constitui, no atual estágio da indústria, o campo mais importante da metalurgia do pó.

Cada vez mais, materiais ferrosos fabricados por metalurgia do pó, e particularmente os aços, vêm se firmando como uma alternativa viável para a fabricação de peças estruturais, destacando-se a indústria automobilística como o maior consumidor destes produtos (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

À medida que novos tipos de pós foram surgindo, com maior compressibilidade e novas técnicas de compactação foram desenvolvidas, maiores densidades e melhores propriedades mecânicas foram conseguidas e a evolução da técnica foi extraordinária, a ponto de peças de aço comum e ligado sinterizados, competirem, em relação às propriedades, com as que são obtidas pelos métodos metalúrgicos tradicionais (CHIAVERINI, 2001).

As técnicas modernas de fabricação que incluem utilização de pós de melhor compressibilidade, dupla compressão, e dupla sinterização, impregnação com cobre ou liga de cobre, permitem atingir densidades elevadas, superiores a $7,5 \text{ g/cm}^3$ (CHIAVERINI, 1986).

2.12 Sinterizado Forjado

Esta técnica será avaliada para a produção do cubo da embreagem magnética, pois este componente sofre maiores esforços mecânicos, e atualmente é produzido por forjamento a frio.

A constante evolução tecnológica da metalurgia do pó abre campos praticamente ilimitados para o emprego dessa técnica. Um dos seus mais recentes

desenvolvimentos, relacionado principalmente com a produção de peças de aço para o setor automobilístico, é o *forjado sinterizado* (CHIAVERINI, 1986).

Quando se fala de componentes de aço sinterizado baixa liga, as técnicas de moldagem por injeção e do sinterizado forjado são as preferenciais. Ambas as técnicas foram desenvolvidas com o intuito de atingir o mais próximo possível a densidade plena da liga, e isto as diferencia do sinterizado convencional onde atingir a densidade total não é o alvo primário (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

As propriedades mecânicas do sinterizado forjado são similares aquelas de aços fundidos. A maior parte das peças forjadas em produção atualmente são utilizadas em aplicações automotivas. Elas consomem cerca de 40.000 toneladas de pó de ferro por ano (PEASE, 2002).

Pela sua aplicação consegue-se obter peças de densidade elevada, onde os poros devem ser diminuídos ao máximo ou eliminados, peças essas destinadas a aplicações que são sujeitas a altas tensões de serviço (CHIAVERINI, 2001).

A produção de um componente sinterizado forjado passa pela produção de um pré-formado produzido por compactação e sinterização para remoção do lubrificante e recozimento pleno das partículas encruadas, seguida da operação de forjamento propriamente dita (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

O ferramental fechado da operação de forjamento do sinterizado minimiza a formação de rebarbas, comuns no forjamento convencional, reduzindo ou eliminando perdas de material nesta operação ou em operações posteriores de usinagem ou retificação (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

O processo, além das vantagens inerentes à própria técnica de metalurgia do pó, proporciona um bom acabamento superficial, possibilidade de obter-se componentes complexos com uma única operação de conformação, carga de forjamento e custos de forjamento menores que no forjamento convencional, obtenção de estrutura fina, com orientação estimada, etc. (CHIAVERINI, 1986).

Como resultado final, obtém-se componentes com densidade acima de 99,5% da densidade teórica da liga, com porosidade praticamente eliminada, e adequados

a aplicações onde altas tensões e/ou carregamentos dinâmicos estão presentes (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

No momento, as peças obtidas pela técnica de forjamento/sinterização são principalmente destinadas à indústria automobilística, principalmente para transmissão, diferenciais e motores, tais como bielas, cames de estatores para transmissão automática, assentos de válvulas, engrenagens diversas, cubos de embreagens de conversores de torque, etc. (CHIAVERINI, 2001).

2.13 Forjamento

Forjamento é o processo de conformação através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão. A maioria das operações de forjamento são efetuadas a quente, embora certos metais possam ser forjados a frio (BRESCIANI, 1991).

Através da deformação plástica produzida pelo forjamento, pode-se conseguir dois efeitos: dar a forma desejada à peça e melhorar as propriedades mecânicas do metal (modificando e distribuindo seus constituintes e refinando o grão) (BRESCIANI, 1991).

De acordo com Bresciani (1991), os forjados a frio apresentam o material encruado, isto é, com limites de resistência maiores e dutibilidades menores.

2.14 Estampagem

A estampagem é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações, por intermédio das quais uma chapa plana é submetida a transformações de modo a adquirir uma nova forma geométrica, plana ou oca (CHIAVERINI, 1986).

A deformação plástica é levada a efeito com o emprego de *prensas de estampagem*, com o auxílio de dispositivos especiais chamados *estampos* ou *matrizes* (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Bresciani (1991), como o processo de estampagem é realizado a frio, na região de conformação plástica da peça ocorre uma elevação da resistência mecânica (encruamento). Nessa região, a peça apresentará então uma resistência mecânica maior do que a da chapa inicial (comumente no estado recozido).

2.15 Compressores de Ar Condicionado

Os compressores têm como função absorver o fluido refrigerante no estado de vapor à baixa pressão que sai do evaporador e comprimi-lo à alta pressão e temperatura até o condensador. Permite assim que no evaporador tenhamos baixa pressão e no condensador alta pressão (SILVA, 2003, p 107-108).

A figura 8 mostra os componentes de um sistema de ar condicionado automotivo, destacando as regiões de alta e baixa pressão devido à ação do compressor.

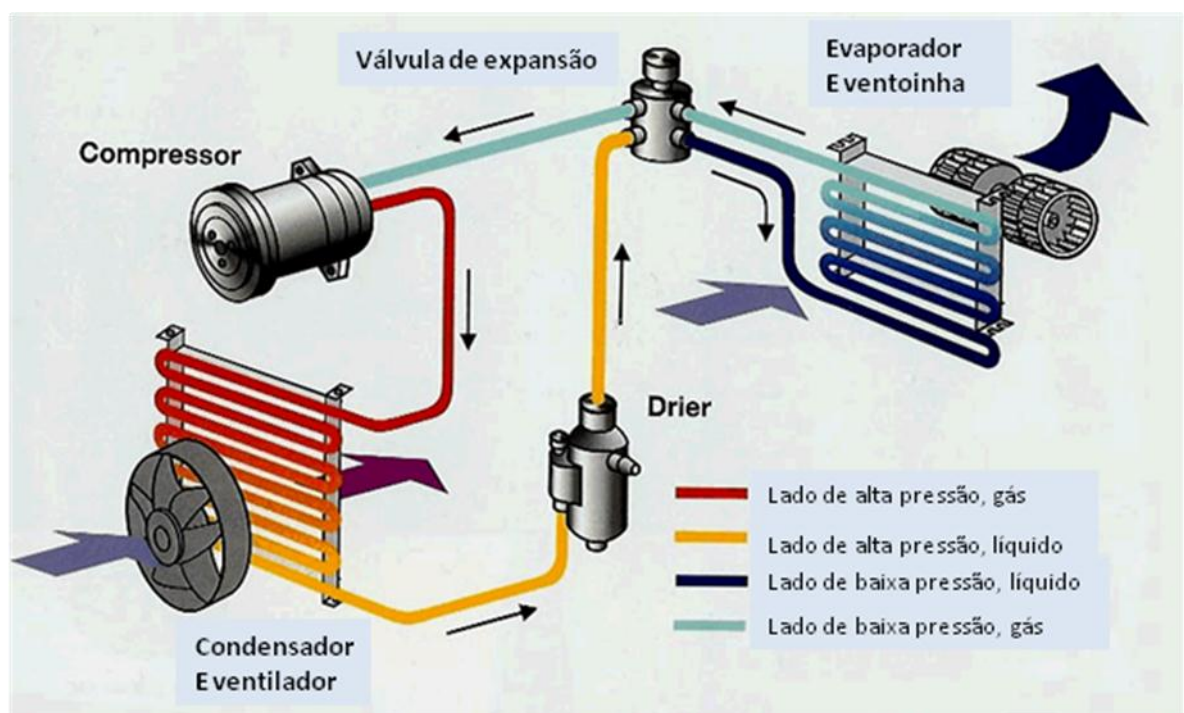


Figura 8: Sistema de Ar Condicionado Automotivo.

Fonte: <http://pcmagnum.blogspot.com.br/2010/03/automobile-air-conditioner.html>

De acordo com Silva (2003), o acionamento dos compressores pode ser do tipo *direto*, que tem um motor ligado diretamente ao compressor ou *indireto*, onde a ligação do motor com o compressor é feita pelo sistema polia-correia.

Os compressores em que os componentes em estudo são aplicados são classificados como: compressores de deslocamento positivo, alternativos, de duplo efeito com acionamento dos pistões através de placa oscilante.

Nos compressores de duplo efeito, o cilindro dispõe de uma câmara de compressão em cada lado do pistão, de modo que são efetuadas duas compressões a cada rotação do eixo do compressor (COSTA, 1978).

2.16 Compressores de Ar Condicionado Automotivos

De acordo com Daly (2006), a função do compressor é comprimir e circular vapor superaquecido de refrigerante em torno de um sistema de circuito fechado.

O compressor é movido por um sistema de polias movido pelo motor. Na frente do compressor está a embreagem magnética que quando acionada engata o compressor. O compressor arrasta o vapor do refrigerante do lado da sucção que é a saída do acumulador (sistema de válvula de orifício fixo) ou a saída do evaporador (sistema de válvula de expansão). Porque o refrigerante que deixou o evaporador/acumulador é um vapor que não pode mais absorver calor e atua como um refrigerador (DALY, 2006).

2.17 Embreagem Magnética

O compressor é movido pelo virabrequim do motor através de um sistema de polias. O sistema de polias fornece movimento permanente para a correia de acionamento de múltiplos canais. Isso significa que uma vez que o motor é ligado a correia de acionamento de múltiplos canais está rotacionando. Há uma folga entre a polia da correia de acionamento de múltiplos canais e a placa motora. Quando o motor está rodando o compressor está estacionário até que o botão A/C é selecionado e o fluxo de potência elétrica atravessa a bobina de geração de campo da embreagem e um campo eletro-magnético que atrai a placa motora em direção a polia da correia de acionamento de múltiplos canais. A placa motora que está acoplada ao eixo do compressor é puxada e mantida contra o sistema de polia de correia de acionamento de múltiplos canais. A embreagem é agora mantida junto como uma unidade e a velocidade rotacional do compressor corresponde a velocidade do motor. Quando o sistema de A/C está sendo ciclado ou não é mais necessário a corrente é selecionada *off* e a força magnética criada no campo da bobina da embreagem esgota. A placa motora desengata através da ajuda de molas de retorno e o compressor para (DALY, 2006).

A placa motora citada por Daly (2006) corresponde a peça chamada de disco da embreagem magnética estudada no projeto de pesquisa. A figura 9 mostra uma embreagem magnética, destacando os elementos como foram citados no texto acima.

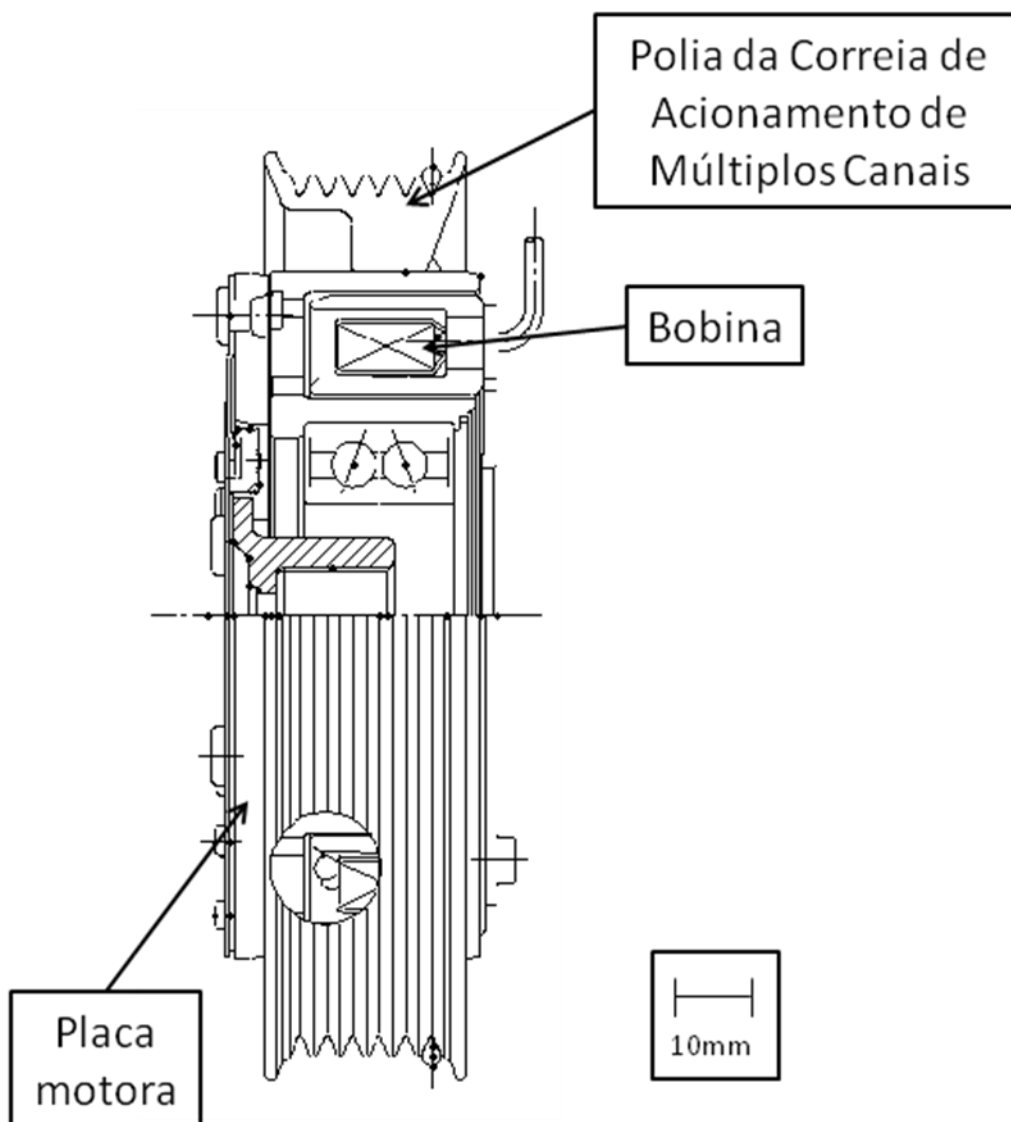


Figura 9: Embreagem Magnética.

Fonte: Autoria Própria

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Determinação dos Carregamentos Mecânicos

Para a determinação dos carregamentos mecânicos a serem suportados pelos componentes em estudo, foram analisados os carregamentos aos quais o compressor de ar condicionado e a embreagem magnética são submetidos durante seu funcionamento, além dos esforços a serem suportados pelos componentes no processo de fabricação da sub-montagem do cubo da embreagem magnética.

O carregamento predominante no funcionamento do compressor, aplicado aos componentes em estudo, é a transferência de torque através destes componentes. No disco, a transferência de torque ocorre da face de atrito para os furos dos rebites, enquanto que no cubo a transferência de torque ocorre dos furos dos rebites para o estriado de encaixe ao eixo do compressor. Para análise do efeito do torque nos componentes, apenas foi necessário determinar os valores de torque no compressor para então aplicar este torque em cada um dos componentes em estudo.

Com a determinação dos carregamentos a serem analisados, seguiu-se para a próxima etapa, a de aplicar estes carregamentos nos componentes no *software* de simulação SolidWorks®, simulando carregamento estático e em fadiga.

Outro carregamento analisado, foi o de compressão na região dos rebites durante o processo de rebitagem, pois neste processo pode ocorrer a fratura das peças.

3.2 Determinação dos Esforços Mecânicos e Propriedades Mecânicas

Na determinação dos esforços mecânicos, foram realizadas simulações computacionais, assim como cálculos teóricos para determinar os esforços a partir dos carregamentos determinados anteriormente.

A partir dos esforços mecânicos, foram analisados parâmetros e considerações, como coeficiente de segurança, de maneira a determinar as propriedades necessárias para que não ocorra a falha dos componentes. As propriedades mecânicas determinadas para o cubo foram tensão de escoamento,

resistência à fadiga e resistência à compressão. Para o disco, foi necessário determinar tensão de escoamento, resistência à fadiga, resistência à compressão e a dureza na face de atrito.

A partir das propriedades mecânicas determinadas, foi obtida uma orientação a respeito do processo de metalurgia do pó a ser utilizado para produzir os componentes. Esta orientação foi obtida consultando a norma MPIF 35.

3.3 Processo de Metalurgia do Pó

A caracterização de como deveria ser um processo de produção por metalurgia do pó para os componentes em estudo considerou o projeto dos componentes, fazendo as alterações e determinação de informações relevantes, para determinar as características do processo.

Foram consideradas as alterações de projeto referentes à geometria e ao dimensional dos componentes a fim de adequar o projeto a este processo proposto.

A partir das propriedades mecânicas, sem considerar alterações de composição química dos materiais, buscou-se a orientação na norma MPIF 35, que relaciona as propriedades mecânicas com a densidade do material sinterizado para diferentes composições químicas de ligas obtidas por metalurgia do pó, a serem utilizadas em componentes mecânicos estruturais.

Então, por fim, pode ser realizado um orçamento do custo destes componentes, se produzidos por metalurgia do pó, de maneira tangível tecnicamente, atendendo os requisitos do processo e da aplicação dos componentes.

4 PROCESSO DE PRODUÇÃO POR METALURGIA DO PÓ

4.1 Etapas do Processo

O estudo do processo de metalurgia do pó foi dividido entre as principais etapas, focado nas considerações de projeto dos componentes para viabilizar a produção dos componentes pela metalurgia do pó de forma competitiva com os processos atuais de produção.

4.1.1 Compactação

Ambos os componentes, devido a suas geometrias, podem ser compactados através da compactação de simples ação, mais simples e de menor custo. O cubo, apesar de apresentar uma altura em torno de 0,57 vezes seu diâmetro externo, pode ser produzido através deste método de compactação.

Dentro de determinados limites é possível compactar-se peças com vários níveis utilizando-se um único punção. As variações de densidade geradas ao longo da peça, dependendo da geometria e aplicação da peça, não comprometem seu desempenho final (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Para esta etapa do processo foram feitas as considerações a respeito das alterações de projeto necessárias para melhorar o processo de compactação, evitando falhas ou desgaste prematuros de ferramentas, refugo de peças, entre outras melhorias, otimizando os custos do processo, a fim de torná-lo competitivo com os processos utilizados atualmente.

Uma grande preocupação no projeto de uma peça sinterizada é com a resistência mecânica dos componentes do ferramental, pois estes componentes trabalham sob grandes tensões (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

4.1.2 Sinterização

Como os componentes possuem composição química comum, aço com baixo teor de carbono, considerado como ferro puro para diversas análises na metalurgia do pó, não há considerações especiais a serem feitas para esta etapa do processo. A sinterização para ligas de ferro se dá em torno de 1100°C e ajustes de tempo e

temperatura mais precisos, em função da geometria dos componentes, seria realizado com análises empíricas, com um possível desenvolvimento do processo para produção dos componentes em estudo.

4.1.3 Operações Posteriores

Como operação posterior, para ambos os componentes, é necessário a etapa de calibragem. Para satisfazer as tolerâncias dimensionais do projeto, é necessário a realização de uma calibragem após a sinterização, sendo que os possíveis aumentos de densidade e dureza superficial decorrentes desta etapa, não são necessários.

As propriedades mecânicas determinadas e desejadas aos componentes podem ser obtidas através de ajustes na etapa da compactação, não sendo necessária adição de etapas posteriores em função destas necessidades de projeto, o que agregaria custos desnecessários ao processo.

5 PROJETO DOS COMPONENTES

5.1 Cubo

Para o cubo, foram consideradas alterações de projeto, que não alteram a funcionalidade da peça, e apenas foram consideradas objetivando a alteração no processo de fabricação. A figura 10 mostra as alterações necessárias, que estão numeradas de 1 a 3.

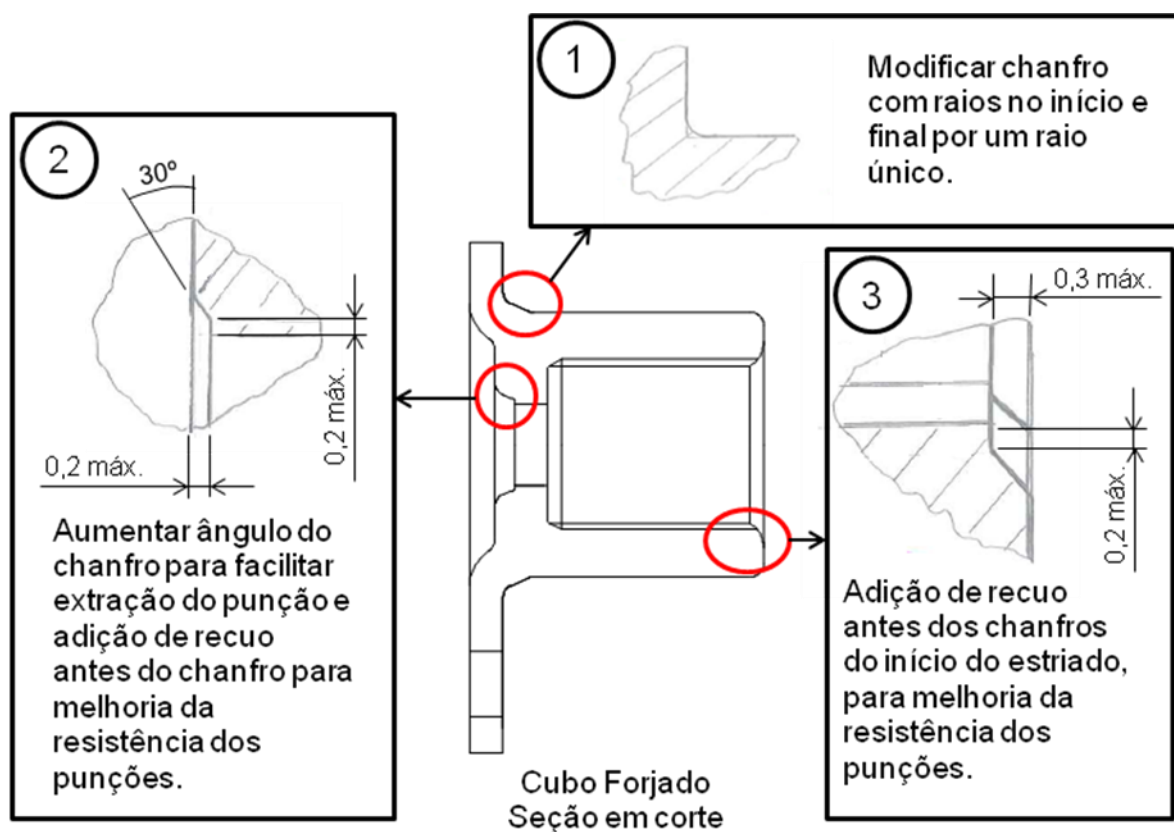


Figura 10: Modificações de Projeto do Cubo (dimensões em mm).

Fonte: Autoria Própria

A alteração número 1 consiste na modificação da transição da flange com o diâmetro externo da região de acoplamento com o eixo. No projeto original, há um chanfro com raios de arredondamento em suas duas extremidades. Para melhoria do ferramental de compactação, seria necessário colocar um único raio de

arredondamento, substituindo o chanfro e os dois raios menores, para assim poder utilizar um maior raio de arredondamento da matriz de compactação e aumentar sua resistência a trincas nesta região.

Esta alteração é essencial para a simplificação do ferramental necessária para uma compactação de simples ação. A figura 11 mostra como este arredondamento na base da flange possibilita a confecção de uma solução conhecida por “matriz com ombro” ou “matriz de enchimento fixo”, e torna possível a eliminação de um punção inferior.

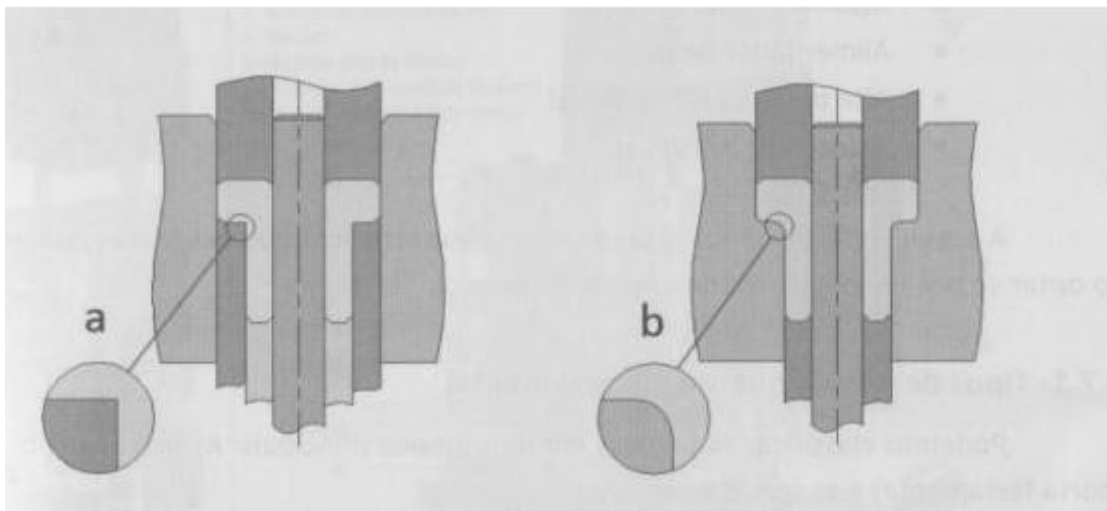


Figura 11: A figura “a” mostra a compactação de uma peça flangeada utilizando-se dois punções inferiores. A figura “b” mostra uma matriz de enchimento fixo com apenas um punção inferior.

Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

A alteração número 2 tem como objetivo, além de aumentar a vida útil do ferramental, eliminar um punção superior para simplificar o ferramental. No projeto original há um ângulo pequeno em relação à direção de avanço do punção e a profundidade deste chanfro é também elevada para um bom desempenho do ferramental de compactação. Além disso, foi adicionado um recuo ao final do chanfro para que o punção superior não seja frágil em sua extremidade localizada ao fim do chanfro. A figura 12 mostra as recomendações para chanfros em peças produzidas por metalurgia do pó, orientação adotada para esta alteração do projeto.



Figura 12: A figura “a1” mostra um chanfro não adequado ao processo de compactação, e a figura “a2” a falha que ocorre em um chanfro como este. A figura “b” apresenta as recomendações a serem adotadas, onde 30° é o valor ideal para α .

Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

Estas alterações no projeto da peça foram orientadas pelo fornecedor, que disponibilizou material de orientação a respeito das recomendações para geometria de peças a serem produzidas por metalurgia do pó, conforme mostrado na figura 13, de acordo com as recomendações da literatura.

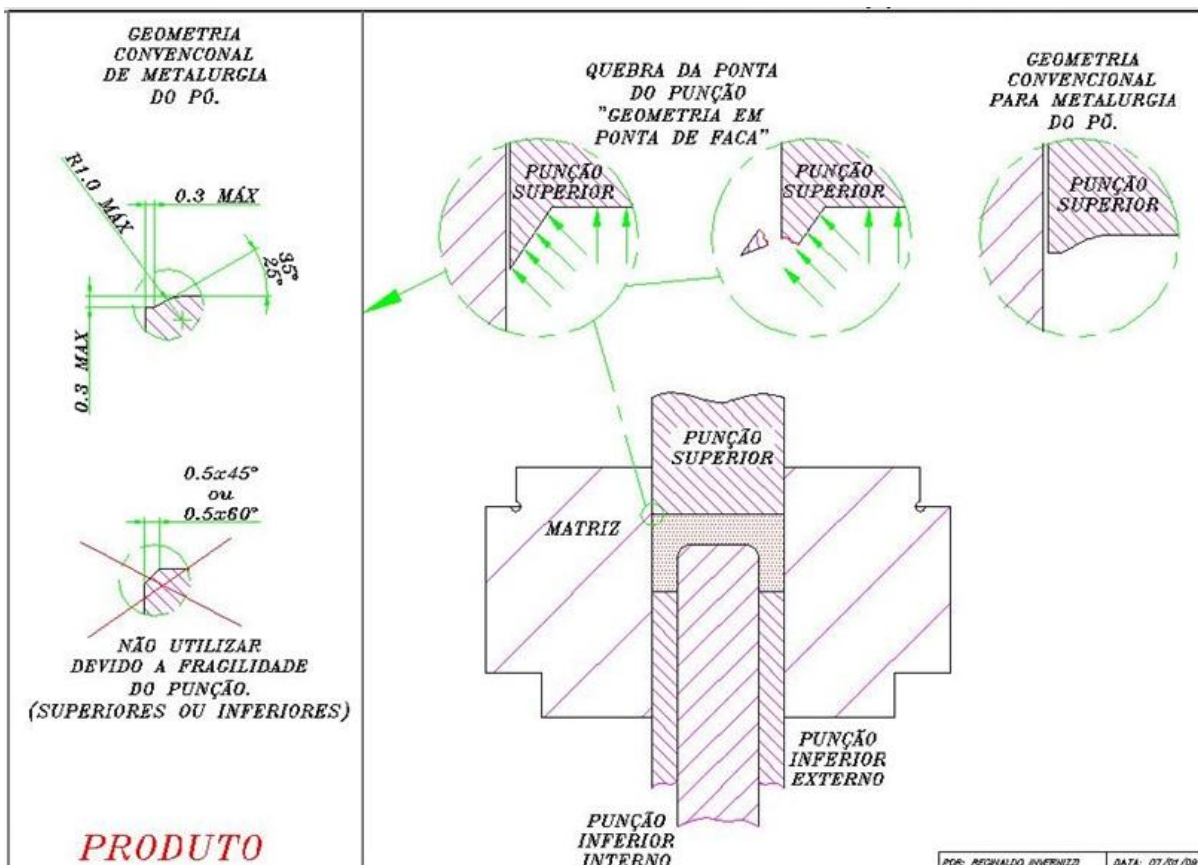


Figura 13: Instruções do fornecedor para geometria de chanfros de componentes a serem produzidos por Metalurgia do Pó.

Fonte: MAHLE Metal Leve Miba Sinterizados Ltda. (Reginaldo Invernizzi).

A alteração número 3 é semelhante à de número 2 e também tem como objetivo a prevenção de falhas do ferramental, apesar de não objetivar a simplificação do ferramental com eliminação de um punção. Basicamente é adicionado um chanfro na extremidade do estriado de acoplamento com o eixo, existindo um recuo do chanfro para que o punção não seja frágil em sua extremidade. A figura 14 mostra um exemplo de peça semelhante produzida por metalurgia do pó e a existência desta geometria na extremidade do estriado.

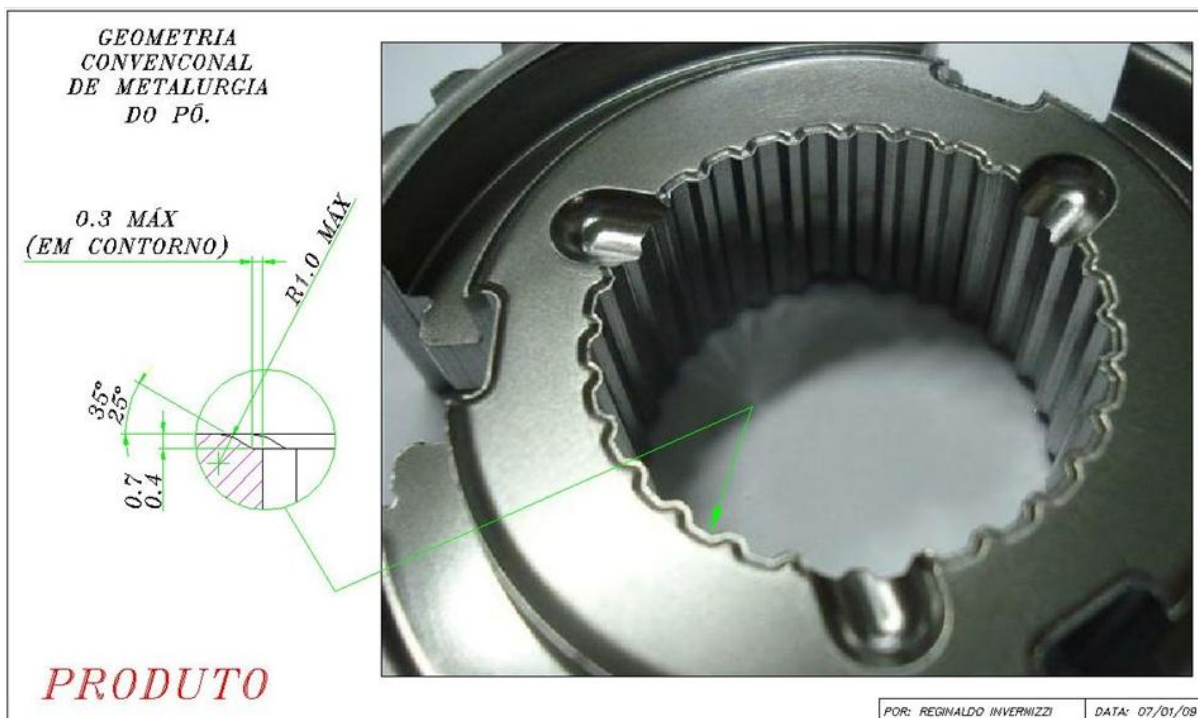


Figura 14: Geometria convencional de Metalurgia do Pó para peças com estriado interno.

Fonte: MAHLE Metal Leve Miba Sinterizados Ltda. (Reginaldo Invernizzi).

5.2 Disco

No disco de atrito, também foram consideradas alterações de projeto, objetivando a alteração no processo de fabricação. A primeira consideração para este componente foi o sentido de compactação, já que é desejada uma maior densidade na face de atrito para que seja a região de maior dureza na peça. A figura 15 mostra a densidade resultante de uma peça compactada por simples ação.

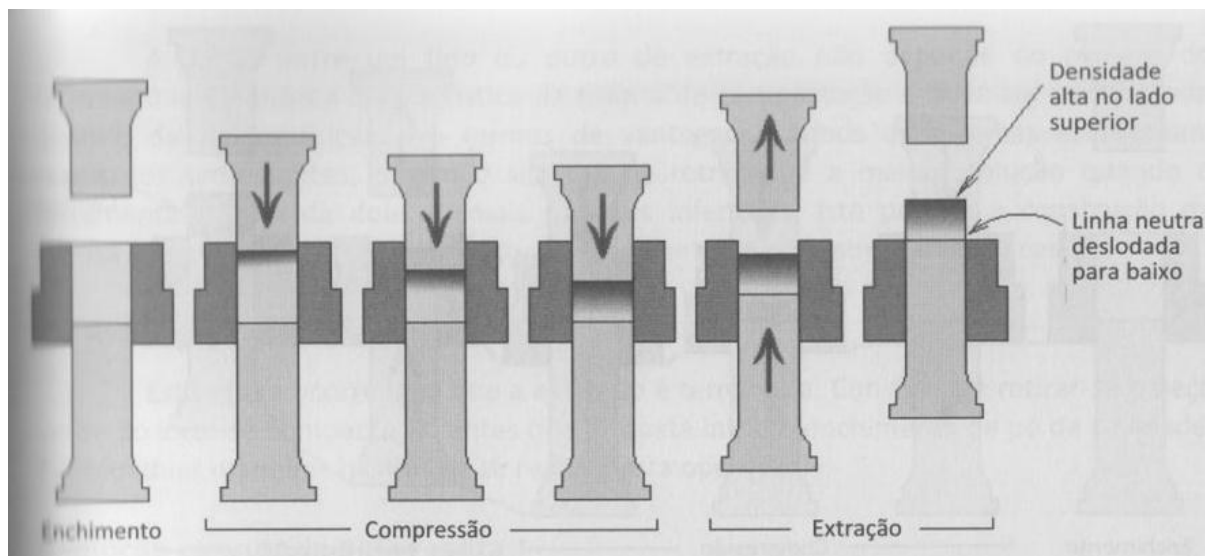


Figura 15: Densidade da peça na compactação de simples ação

Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

Portanto, para obter a distribuição de densidade desejada, o sentido de compactação e extração para o disco deverá ser como mostrado na figura 16.

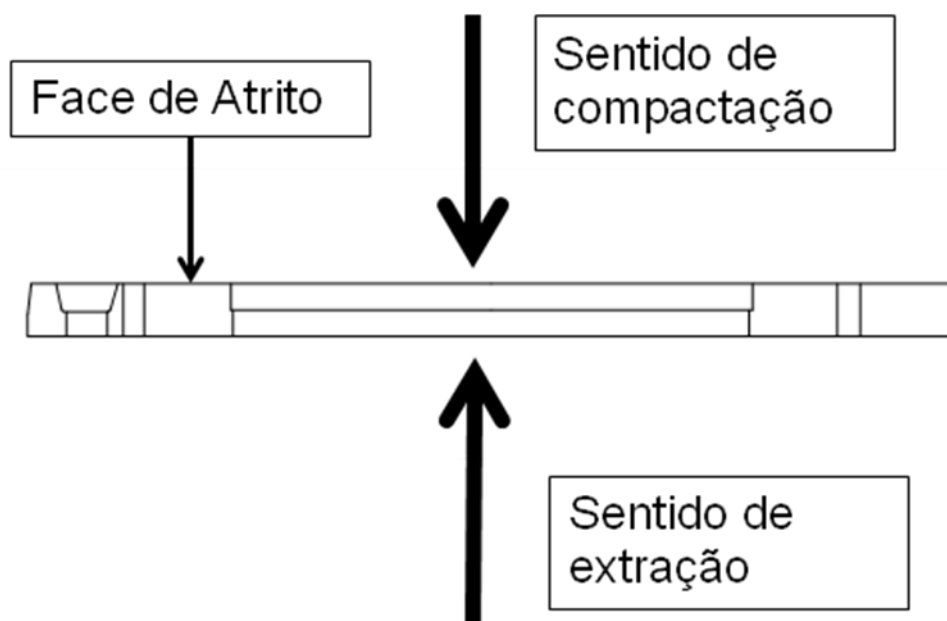


Figura 16: Sentidos de compactação e extração para o disco de atrito.

Fonte: Autoria Própria

Considerando os sentidos de compactação e extração indicados, as alterações de projeto consideradas para o disco são mostradas na figura 17, e estão numeradas como 1 e 2.

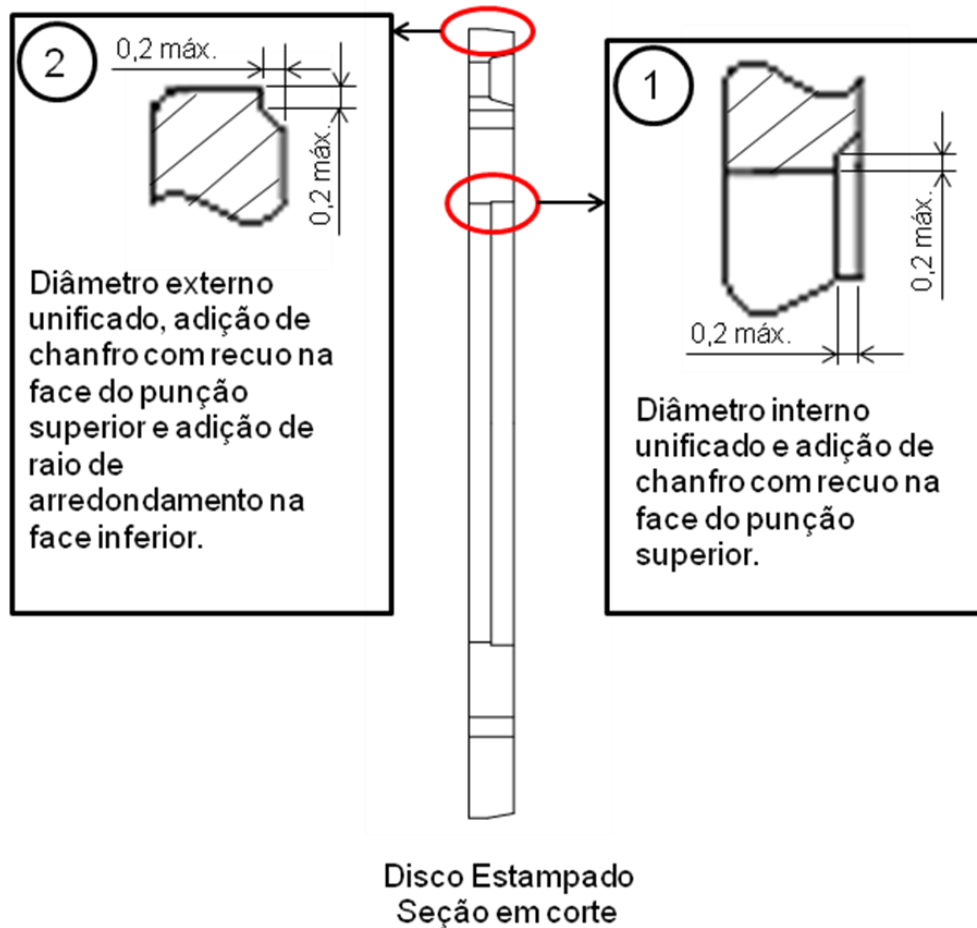


Figura 17: Modificações de Projeto do Disco (dimensões em mm).

Fonte: Autoria Própria

A alteração número 1 consiste na alteração do diâmetro interno do disco de atrito, deixando com apenas um único diâmetro através da espessura da peça, e adicionando um chanfro com recuo na face do punção superior. No projeto original para processo de estampagem, há dois diâmetros nesta região, um valor para a região cisalhada e outro para a região fraturada durante o estampo. A existência desses dois diâmetros não faria sentido para o processo de metalurgia do pó, assim um dos diâmetros foi eliminado para que o diâmetro interno da peça seja feito por apenas um punção de compactação. Além disso, esta alteração, assim como as

realizadas no cubo, tem o objetivo de aumentar a resistência do ferramental de compactação melhorando sua vida útil.

A alteração de número 2 faz a adaptação do diâmetro externo da peça ao processo de metalurgia do pó. Do lado da face que deve ser a inferior na compactação, foi adicionado um raio de arredondamento com o intuito de eliminar um punção inferior com a utilização de uma “matriz de enchimento fixo”. Do lado oposto, superior, foi adicionado um chanfro com recuo com o objetivo de melhorar a vida útil do ferramental. No projeto original para estampagem está dimensionado dois diâmetros, um para a região cisalhada e outro para a extremidade ao final da região fraturada, que está representada como um chanfro sem dimensional. Como na alteração do diâmetro interno, não faria sentido dois diâmetros nesta região e foi deixado com apenas um diâmetro que será resultante da matriz de compactação.

A alteração através da adição de chanfros ou raios, com recuos, poderia ser aplicada a outra região da peça, nas extremidades das faces nos oblongos que há na peça. Para este estudo, não foi considerado, pois devido à pequena largura deste vão, envolveria alterações dimensionais na peça desnecessárias de serem estudadas no caráter deste estudo, sem afetar o resultado deste.

Outra região da peça que poderia ser modificada para melhoria do processo de metalurgia do pó é a região dos alojamentos dos rebites. Como alterações nestas regiões envolveriam análises e mudanças em outros componentes, estas alterações não foram avaliadas neste estudo preliminar, devendo ser avaliado no caso de um desenvolvimento real de mudança do processo. Porém, foi possível a análise, pois esta mudança traria melhorias ao processo, sendo possível a produção sem esta alteração, não afetando o resultado deste estudo.

6 RESULTADOS

6.1 Determinação dos Carregamentos Mecânicos

6.1.1 Carregamento Estático de Torque

Na determinação do carregamento mecânico estático, foi considerado o torque máximo que um compressor pode chegar em funcionamento, que é de 100 N.m, valor que já considera uma margem de segurança e é baseado em histórico de testes da matriz da empresa no Japão, em que é possível chegar próxima a este valor em determinadas condições de funcionamento.

6.1.2 Carregamento Dinâmico de Torque

Para a obtenção do torque dinâmico máximo, a ser considerado na variação cíclica do torque na vida em fadiga, foi utilizado a curva de consumo de potência do compressor, fazendo a correlação do torque com a potência através da equação (1), onde P é a potência consumida em kW, T é o torque em N.m, n a velocidade de rotação do compressor em rpm e a constante com valor 9549,2966 é resultante da conversão de unidades.

$$T(N.m) = \frac{P(kW) \times 9549,2966}{n(rpm)} \quad (1)$$

Aplicando a equação (1) aos polinômios das curvas de consumo de potência de três modelos de compressores que utilizam o modelo de embreagem magnética que possui os componentes em estudo, foi obtido o gráfico 1, mostrando as curvas de torque para os três modelos de compressores. Os três modelos de compressores analisados são os mais utilizados com a embreagem magnética que possui os componentes, e outros modelos que podem utilizar esta embreagem magnética são variações muito similares, que não apresentam variações significativas em relação aos modelos analisados.

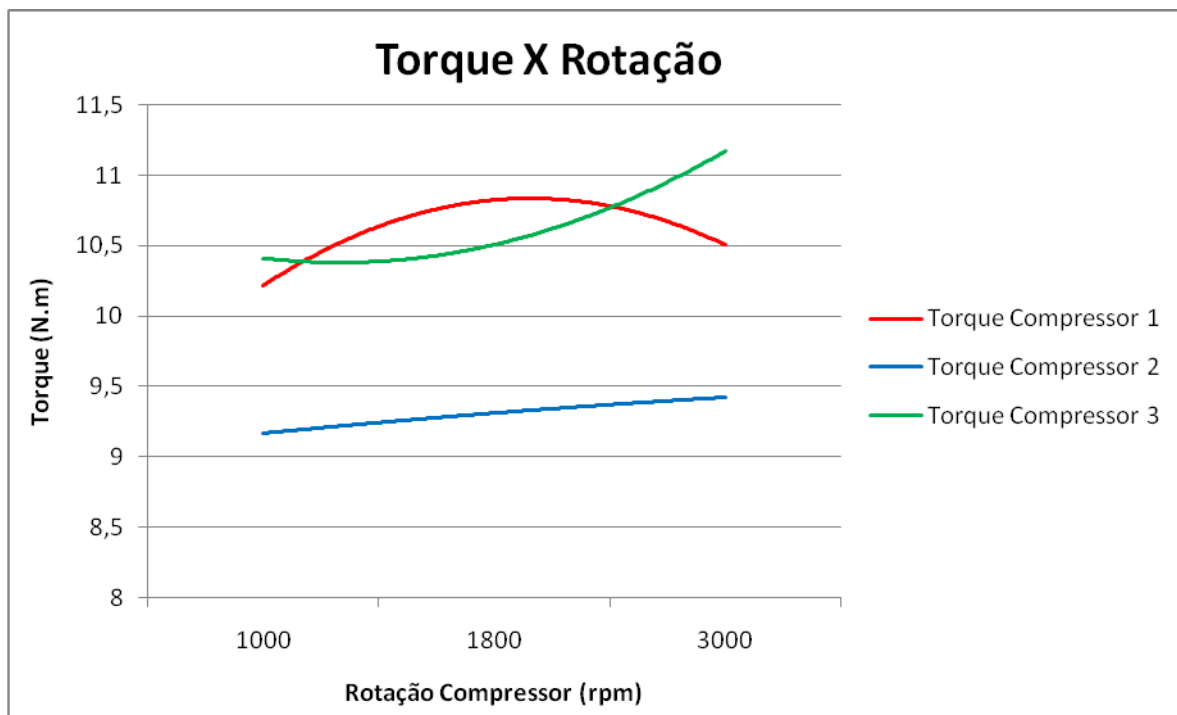


Gráfico 1: Curvas de torque em função da rotação para três modelos de compressores.

Fonte: Autoria Própria

Através da análise das curvas, conclui-se que o torque máximo atingido no funcionamento de um compressor, já considerando uma margem de segurança no arredondamento, é de 11,5 N.m. Por isso, será considerado que nos ciclos de funcionamento do compressor o torque varia de 0 a 11,5 N.m.

Para determinação da vida em fadiga, foram feitas algumas considerações a respeito da aplicação, para determinar o número de ciclos que os componentes devem suportar. A primeira consideração é que os componentes devem suportar uma vida útil de 10 anos. Estes 10 anos devem ser suportados com uma carga horária alta, de 12 horas diárias, em veículos de aplicações comerciais, como por exemplo, frotas ou táxis. Neste período de funcionamento, foi arbitrado um número de ciclos igual a 4 por minuto, que é o número de vezes que a embreagem magnética acopla e desacopla para fazer o ajuste da carga térmica no sistema de ar condicionado, este número de ciclos por minuto é normal em determinadas condições de uso, sendo que considerar este número permanentemente é uma

consideração conservadora, porém é uma margem de segurança que absorve variações do torque sem que haja desacoplamento da embreagem magnética.

Os dados referentes as considerações da vida útil foram colocados na tabela 3, que mostra o número de ciclos a ser considerado na vida em fadiga.

Tabela 3 – Cálculo do número de ciclos para vida em fadiga

Cálculo número de ciclos	
Vida útil (anos)	10
Dias por ano	365
Horas por dia	12
minutos por hora	60
ciclos por minuto	4
Número de ciclos	10512000

Fonte: Autoria Própria

O número de ciclos determinado a partir das considerações foi de 10.512.000 ciclos, valor aproximado para 10.000.000 de ciclos, ou simplesmente 10^7 .

Portanto, o carregamento de torque para vida em fadiga é uma variação de 0 a 11,5 N.m com 10^7 ciclos.

6.1.3 Carregamento de Rebitagem

Este carregamento atua simplesmente como uma força estática de compressão dos componentes, portanto foram considerados apenas os valores máximos de carga de rebitagem especificados para este processo.

Para os rebites do cubo, a carga máxima de rebitagem é de 9,5 toneladas, que divide-se entre três rebites. Portanto é aplicado uma carga de 3,17 toneladas em cada rebite, que convertido para Newtons, dá uma carga de aproximadamente 31,1 kN por rebite.

Na rebitagem do disco, a carga máxima é de 6,5 toneladas, que também divide-se em três rebites. Então é aplicado uma carga de 2,17 toneladas em cada rebite, correspondente a uma carga de aproximadamente 21,3kN por rebite.

6.2 Determinação dos Esforços Mecânicos

6.2.1 Esforços resultantes do torque estático

Com o torque estático de 100 N.m, aplicado ao cubo, foi determinada a força tangencial atuante nos dentes do estriado, carregamento a ser aplicado na simulação, fazendo o engaste nos furos dos rebites. Para calcular a força tangencial nos dentes foi considerado o raio médio dos dentes, que é de 6,5 mm. A figura 18 mostra o raio médio, R_m , a força tangencial, F_T , que atua nos dentes do estriado do cubo e o torque T .

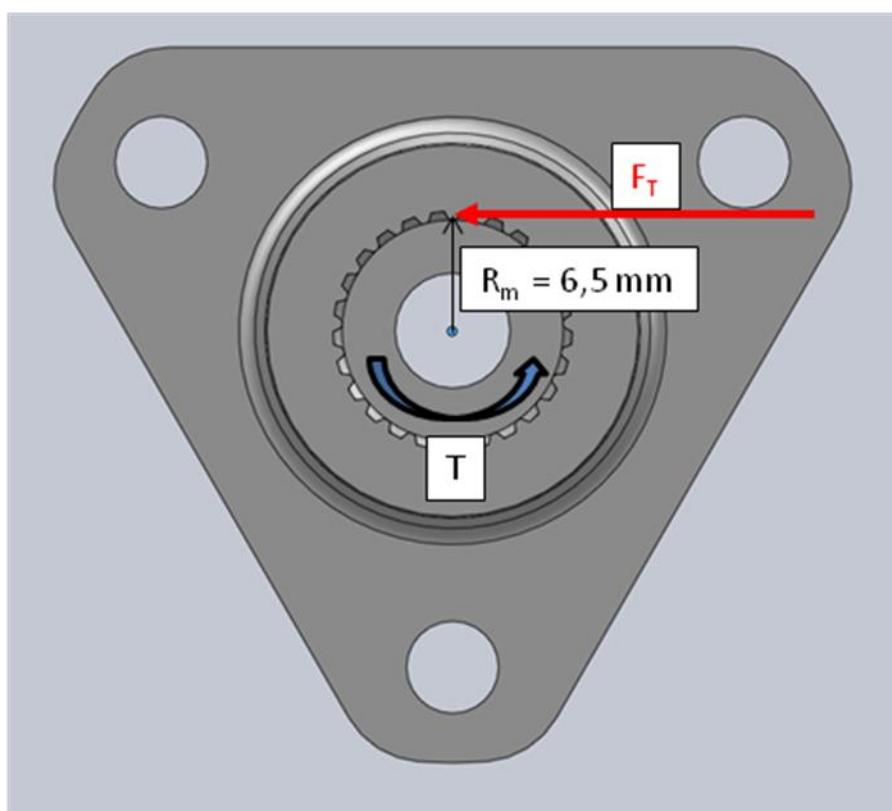


Figura 18: Torque (T) e força tangencial (F_T) atuantes no cubo e raio médio (R_m) onde atua a força tangencial.

Fonte: Autoria Própria

Para calcular a força tangencial, F_T , a partir do torque, T , foi utilizada a equação (2), onde R_m é o raio médio dos dentes do estriado. O valor para F_T encontrado a partir desta equação corresponde ao somatório das forças tangenciais em todos os dentes, pois está sendo obtida a partir do torque aplicado a peça e assume-se que este distribui-se uniformemente em todos os dentes.

$$F_T (N) = \frac{T(N.m)}{R_m (m)} \quad (2)$$

Sendo assim, temos que:

$$F_T (N) = \frac{100(N.m)}{6,5 \times 10^{-3} (m)} = 15384,6N$$

Porém, para aplicar esta força na simulação é necessária a composição de vetores para obter a componente da força normal a face dos dentes, F_N . A figura 19 mostra esta composição, com o ângulo formado entre a face dos dentes e a direção radial.

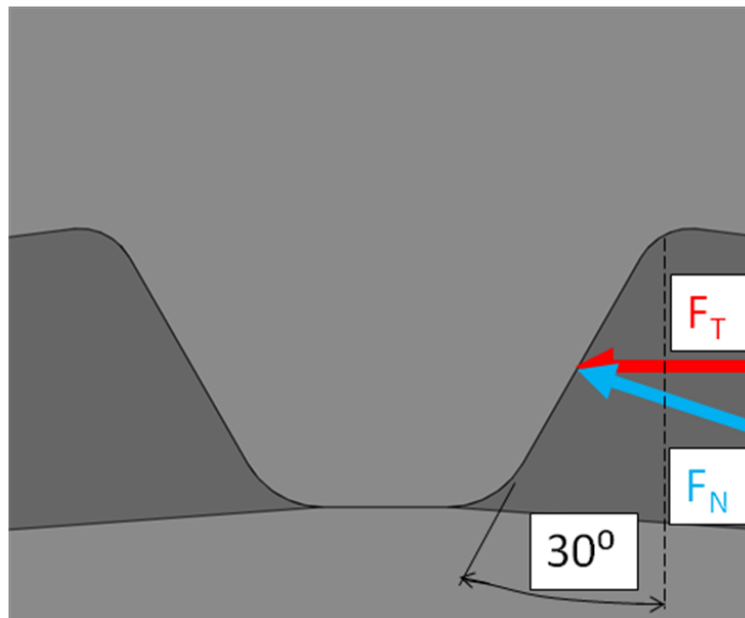


Figura 19: Força tangencial (F_T) e força normal (F_N) atuantes no dente do estriado do cubo e ângulo da face do dente.

Fonte: Autoria Própria

Seguindo a orientação mostrada na figura 18, temos que a força normal, F_N , pode ser obtida a partir da força tangencial, F_T , através da equação (3). Assim como para F_T , o valor de F_N corresponde ao somatório das forças em todos os dentes.

$$F_N(N) = \frac{F_T(N)}{\cos(30^\circ)} \quad (3)$$

Sendo assim, temos que:

$$F_N(N) = \frac{15384,6(N)}{\cos(30^\circ)} = 17764,6N$$

Portanto, o valor total da força a ser aplicada nos dentes do cubo é de 17764,6 N, a figura 20 mostra a aplicação desta força ao cubo na simulação.

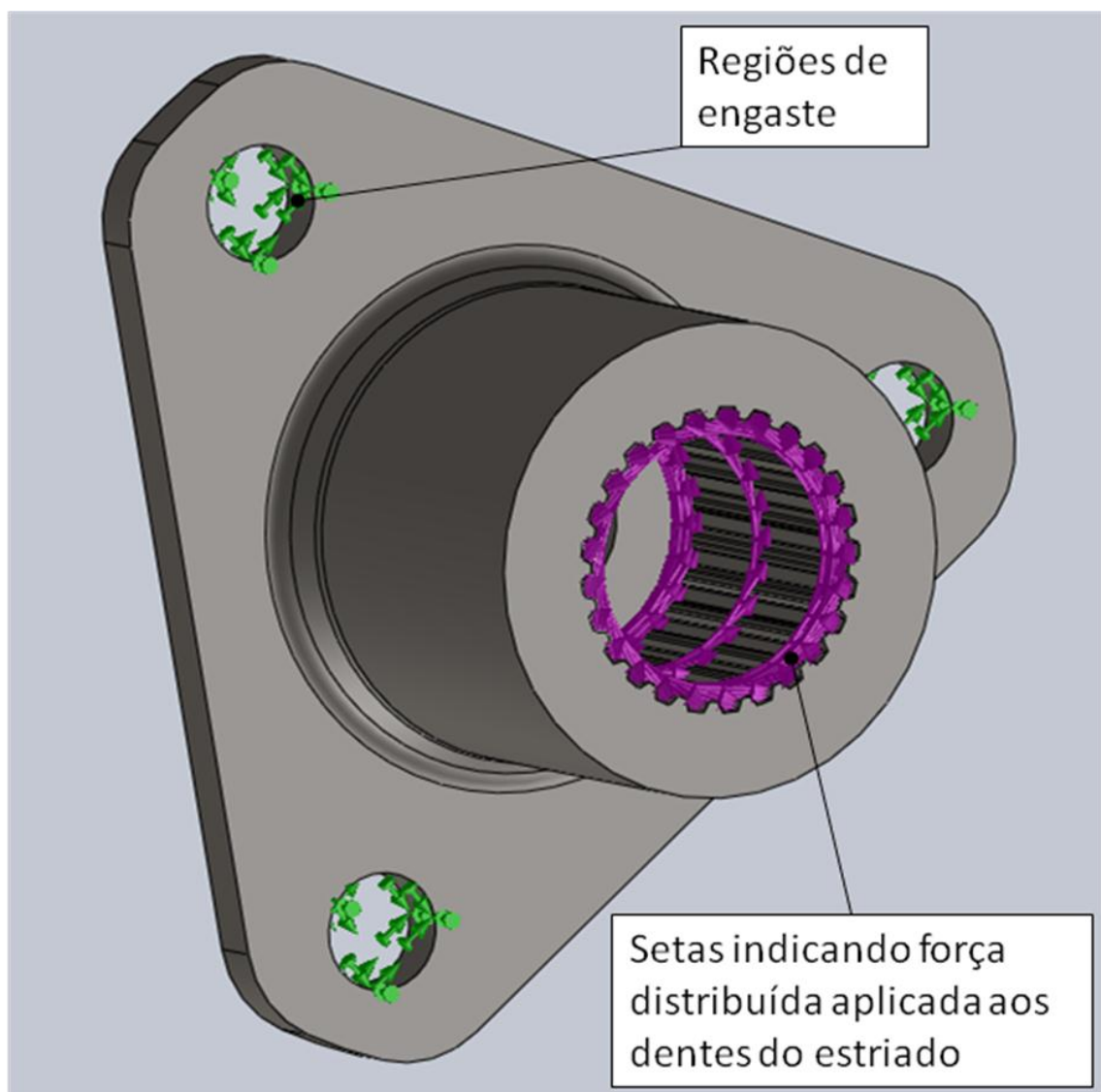


Figura 20: Aplicação da força correspondente ao torque no cubo.

Fonte: Autoria Própria

Para o disco, de maneira análoga ao cubo, deve-se aplicar o torque estático fazendo o engaste nos furos dos rebites. Porém, como o torque deve ser aplicado na face de atrito, é possível fazer a simulação utilizando diretamente o valor do torque, distribuído uniformemente na face de atrito. Portanto, o torque aplicado é de 100 N.m. A figura 21 mostra o disco, com o engaste nos furos e o torque sendo aplicado na face para realizar a simulação.

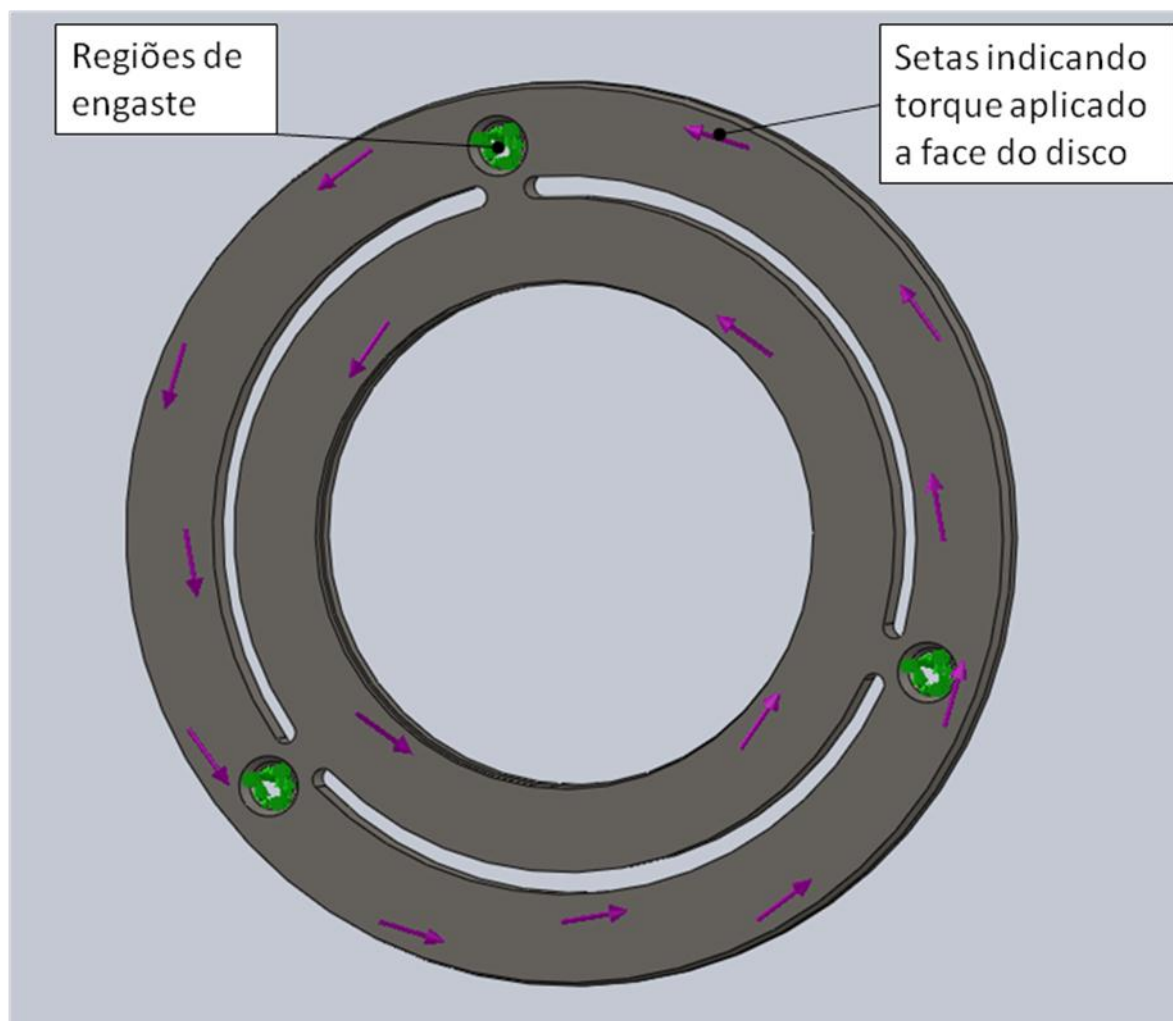


Figura 21: Aplicação de torque no disco.

Fonte: Autoria Própria

6.2.2 Esforços resultantes do torque dinâmico

Para a realização de simulações de fadiga no *software* SolidWorks Simulation®, é necessário criar um estudo estático que depois será incluído no estudo de fadiga junto com os dados cíclicos. Para ambos os componentes, a

criação do estudo estático baseou-se em alterar a carga de torque de 100 N.m para 11,5 N.m.

Para o cubo, porém, é necessário transformar este torque na força normal aplicada aos dentes do estriado. Primeiro, utilizando a equação (2), calcula-se a força tangencial F_T :

$$F_T (N) = \frac{11,5(N.m)}{6,5 \times 10^{-3} (m)} = 1769,2N$$

Então, através da equação (3), é obtido o valor da força normal, F_N :

$$F_N (N) = \frac{1769,2(N)}{\cos(30^\circ)} = 2042,9N$$

Portanto, a força total a ser aplicada nas faces dos dentes do estriado do cubo para a simulação de fadiga é de 2042,9 N.

6.2.3 Esforços resultantes da carga de rebitegem

Na rebitegem, ocorre uma compressão do material na região dos rebites, assim utiliza-se os carregamentos determinados anteriormente, que são 31,0 kN para cada rebite do cubo e 21,3 kN para cada rebite do disco. As áreas para aplicação destas forças devem ser determinadas a partir do dimensional dos rebites, considerando as regiões de assentamento na peça e no rebite.

6.3 Determinação das Propriedades Mecânicas

6.3.1 Tensão de escoamento dos componentes

Para determinar a tensão de escoamento, foi realizada a simulação aplicando os esforços referentes ao torque estático, para ambos os componentes.

6.3.1.1 Cubo

Primeiramente, foi realizada a simulação de torque no cubo, aplicando a força nos dentes de 17764,6 N de acordo com a orientação mostrada no item 6.2.1. A figura 22 mostra os parâmetros da simulação.

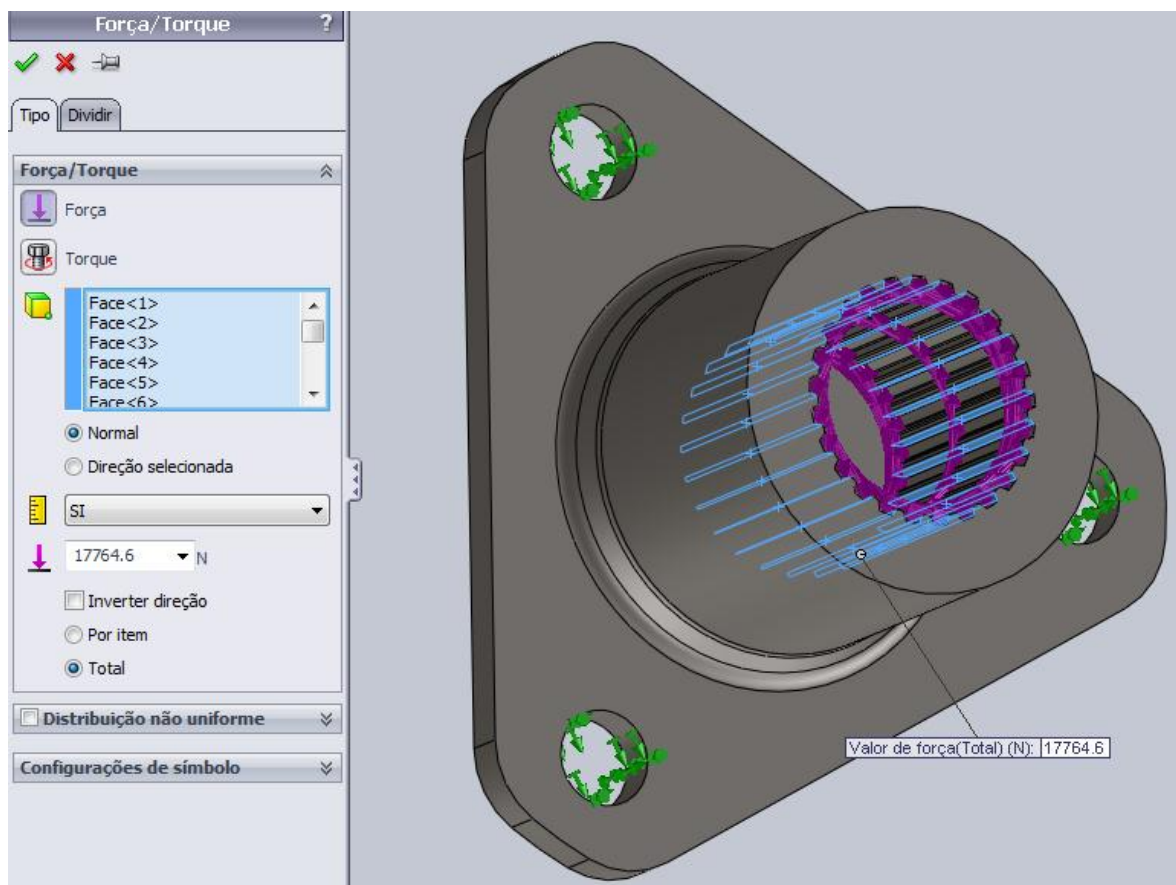


Figura 22: Simulação de torque estático no cubo.

Fonte: Autoria Própria

Para execução da simulação optou-se por utilizar malha de densidade grossa com base em curvatura, justamente porque as regiões de maior interesse na peça ficam com uma malha mais refinada utilizando este parâmetro. Então optou-se por utilizar os parâmetros de malha com base em curvatura padronizados pelo *software*, para esta simulação inicial. A figura 23 mostra a malha do cubo e seus parâmetros.

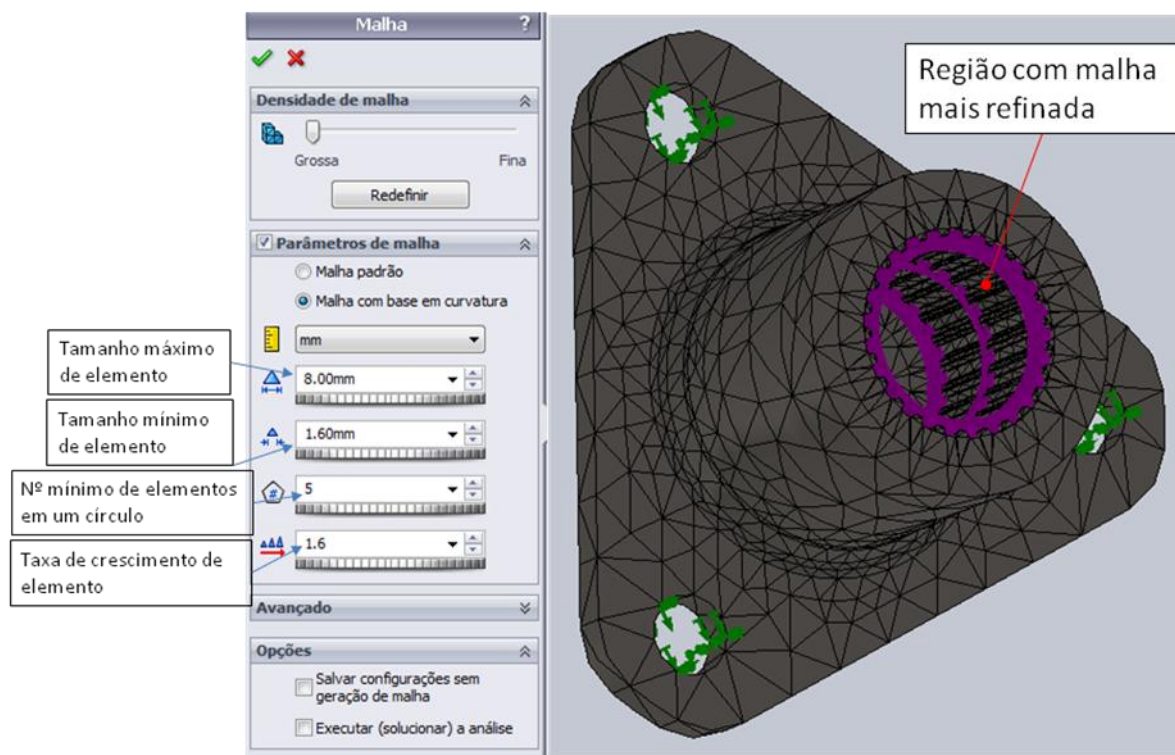


Figura 23: Parâmetros de malha para simulação do cubo.
Fonte: Autoria Própria

O material escolhido para a peça foi o aço AISI 1010 laminado à quente da biblioteca do *software*, com alterações em suas propriedades de acordo com as propriedades do material da peça atual, que é forjada. Os valores das propriedades são resultados de ensaios com o material, que é SAE 1010. Os valores adotados foram de 320 MPa de tensão de escoamento e 401 MPa de tensão última de tração, desconsiderando o aumento de resistência do material após o forjamento. Para estimar o aumento de resistência com o forjamento na região do estriado, foram preparadas amostras para medição de microdureza nesta região, obtendo-se uma microdureza média de 180 HV. Este valor foi utilizado para o cálculo da tensão de resistência à tração, utilizando a equação (4), onde TS é a tensão de resistência à tração em MPa, HB é a dureza do material na escala Brinell e 3,45 é a constante considerada para os aços.

$$TS(MPa) = 3,45 \cdot HB \quad (4)$$

Conforme mostrado na tabela 4, fazendo a conversão da dureza na escala Vickers para a escala Brinell, o valor de 180HV corresponde a 180HB, ou seja, para este nível de dureza os valores são numericamente iguais nas duas escalas.

Tabela 4 – Tabela de conversão de escalas de dureza

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hard- ness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hard- ness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)
						15-T Scale, 15-kgf, (HR 15-T)	30-T Scale, 30-kgf, (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf, (HR 45-T)	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	94
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	93
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	91
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	90
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	89
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	88
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	87
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	86
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	85
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	84
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	83
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	82
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	81
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	80

Fonte: ASTM, 2002.

Sendo assim, utilizando a equação 4, temos que a tensão última de resistência à tração, na região do estriado é de:

$$TS(MPa) = 3,45 \cdot 180 = 621MPa$$

Este valor de resistência à tração mostra que há um significativo aumento da resistência mecânica na região do estriado devido ao encruamento que o componente sofre durante o forjamento. Como não é possível determinar a tensão de escoamento para esta região da peça após o forjamento, será adotado o valor da matéria-prima, de 320 MPa, porém sabe-se que é uma consideração conservadora e que este valor após o forjamento é maior.

Após os resultados preliminares, o material será alterado para ter propriedades semelhantes às que se deseja para a peça produzida por metalurgia do pó, porém como o software não considera na alteração de densidade a porosidade e suas descontinuidades de material, a alteração de propriedades do material não influencia nos resultados das simulações, apenas na indicação de ultrapassagem ou não da tensão máxima de resistência do material.

Com a execução da simulação, chegou-se aos resultados de tensão de escoamento mostrados na figura 24, com valor máximo de tensão de 298,8 MPa, localizado na base dos dentes do estriado.

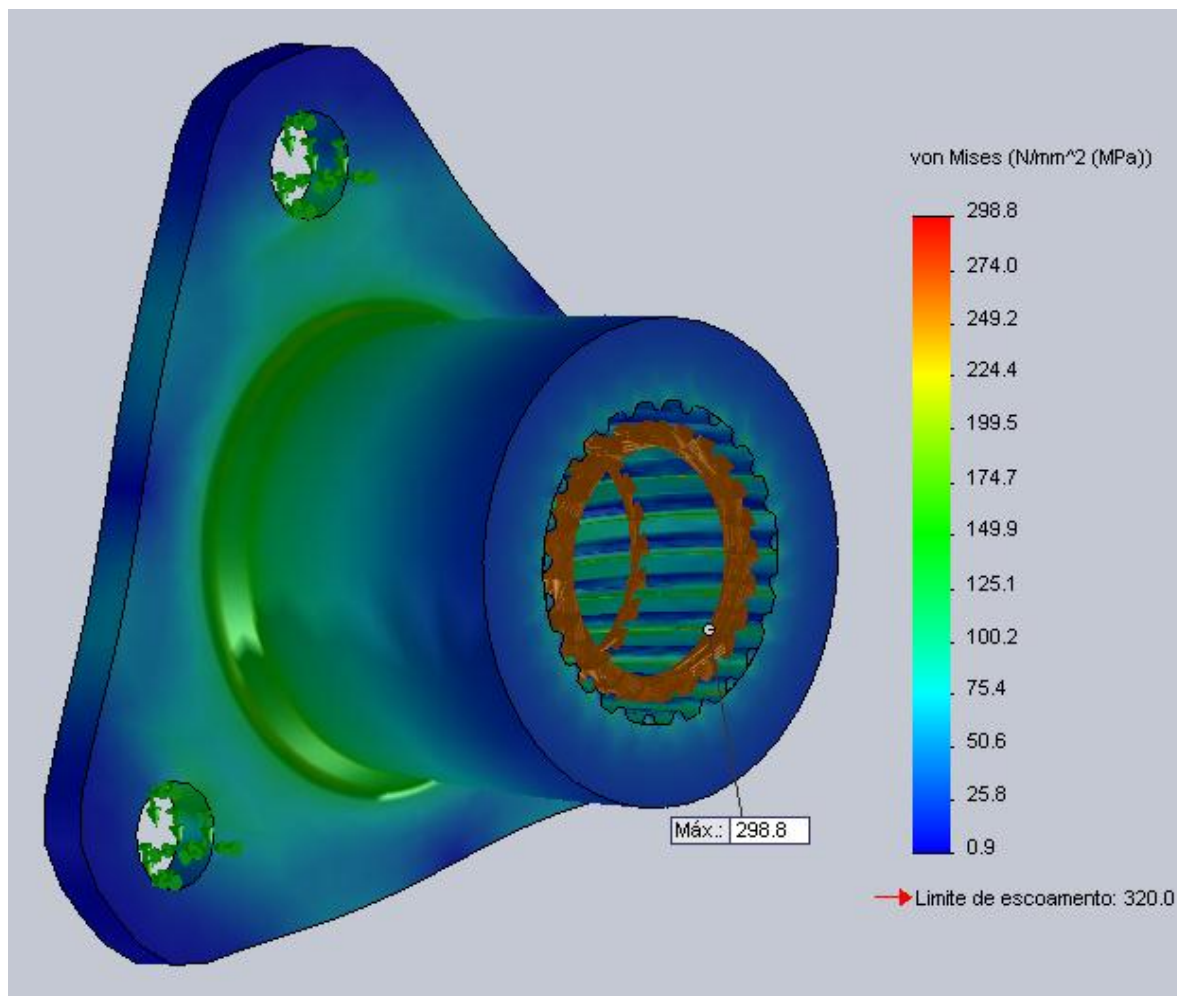


Figura 24: Distribuição de tensão em simulação inicial no cubo.

Fonte: Autoria Própria

O resultado obtido nesta simulação inicial gerou dúvidas quanto aos valores de tensão obtidos, pois se esperava valores inferiores de tensão para este carregamento, que está próximo a tensão de escoamento do material forjado e ainda não está sendo considerado coeficiente de segurança.

Após diversas tentativas de obter resultados coerentes através de modificações na malha de elementos finitos sem sucesso, pois não houve variação significativa da tensão com estas modificações, optou-se por fazer uma verificação empírica com a peça forjada.

Para fazer uma contra prova do resultado da simulação e determinar um fator de correção a fim de tornar os resultados coerentes com a realidade, foi realizado um teste para verificação do torque máximo suportado pela peça forjada. O teste ocorreu fazendo-se a fixação do cubo através do estriado em um eixo engastado, e aplicando-se o torque nos furos dos rebites com um dispositivo para medir o torque máximo atingido até o rompimento da peça, que ocorreu sempre no estriado. O valor médio de torque suportado pela peça no teste foi de 550 N.m. Com este valor de torque, foi então calculado o valor da força tangencial, F_T , através da equação (2).

$$F_T (N) = \frac{550(N.m)}{6,5 \times 10^{-3} (m)} = 84615,4N$$

E a força normal aos dentes, F_N , através da equação (3).

$$F_N (N) = \frac{84615,4(N)}{\cos(30^\circ)} = 97705,4N$$

Realizando uma nova simulação, considerando o torque suportado pela peça forjada, chegou-se ao resultado mostrado na figura 25, com uma tensão máxima de 1643,6 MPa, o que comprova haver significativa divergência entre os resultados das simulações e a realidade.

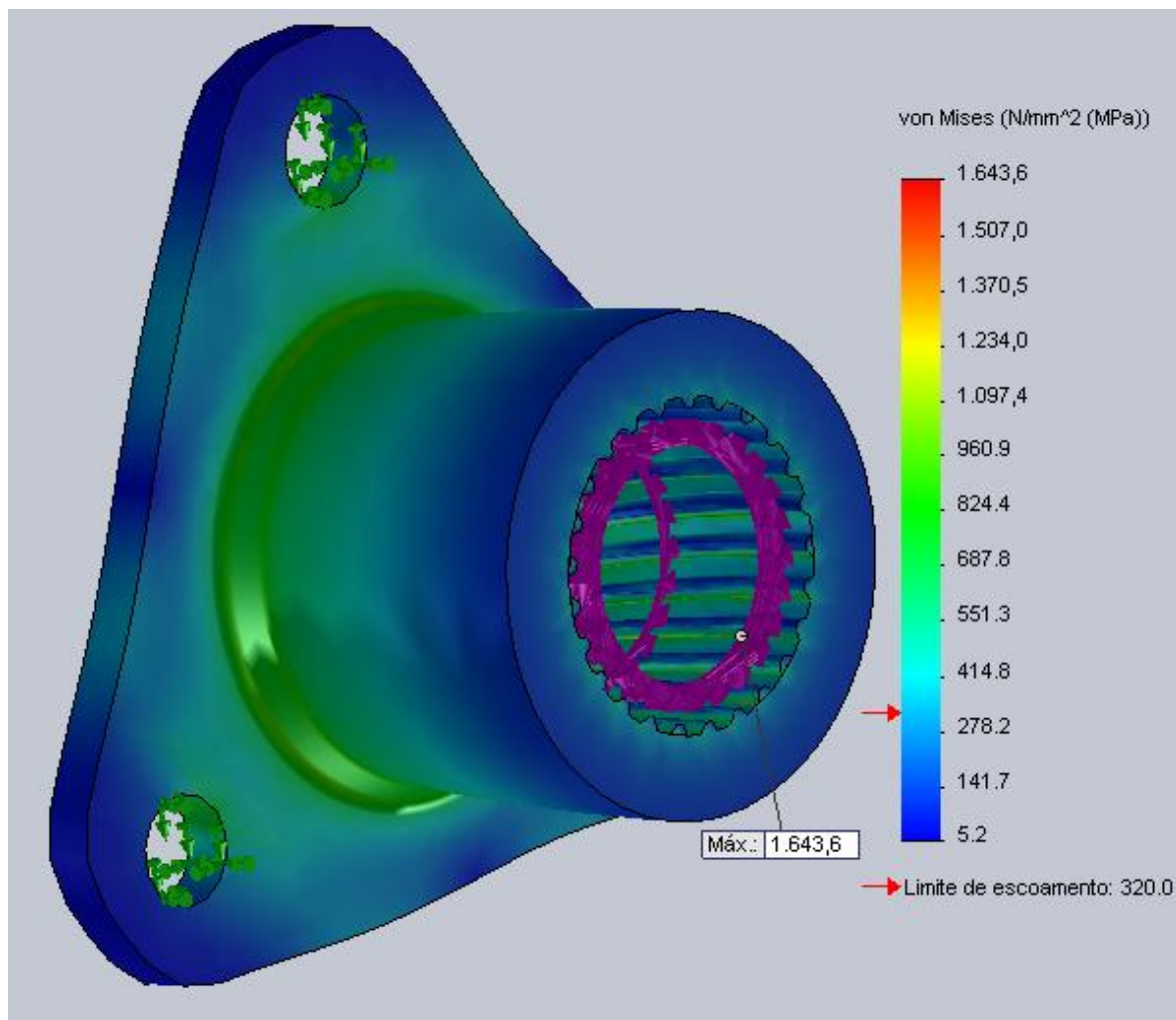


Figura 25: Resultado de simulação com torque suportado pelo forjado.

Fonte: Autoria Própria

Para determinar o fator de correção das simulações, f_c , foi simplesmente calculada a razão entre a tensão de escoamento do material, 320 MPa, que deveria ser a tensão máxima na simulação se esta correspondesse a realidade e a tensão máxima indicada, 1643,6 MPa.

$$f_c = \frac{320(\text{MPa})}{1643,6(\text{MPa})} = 0,19$$

O fator de correção, f_c , obtido foi de 0,19, mostrando grande divergência no resultado da simulação, que apresenta tensões aproximadamente 5 vezes maior que as tensões realmente alcançadas quando se aplica torque a esta peça.

Aplicando o fator de correção, $f_c = 0,19$ ao resultado da primeira simulação, com 100 N.m de torque, que atingiu 298,8 MPa, chega-se ao valor de tensão de escoamento que a peça deve suportar de 56,8 MPa.

Conforme orientação para projetos da empresa, para um componente com o grau de criticidade de aplicação como o cubo, o coeficiente de segurança deve ser igual 2. Portanto, a tensão de escoamento para os dentes do estriado deve ser de aproximadamente 113,6 MPa. Fazendo um arredondamento, para um valor maior, definiu-se que a tensão de escoamento exigida para o componente é de 120 MPa.

6.3.1.2 Disco

Para o disco, analogamente, foi aplicado o torque de 100 N.m ao disco, a figura 26 mostra os parâmetros da simulação, aplicando-se o torque diretamente a face do disco, com engastes nos furos.

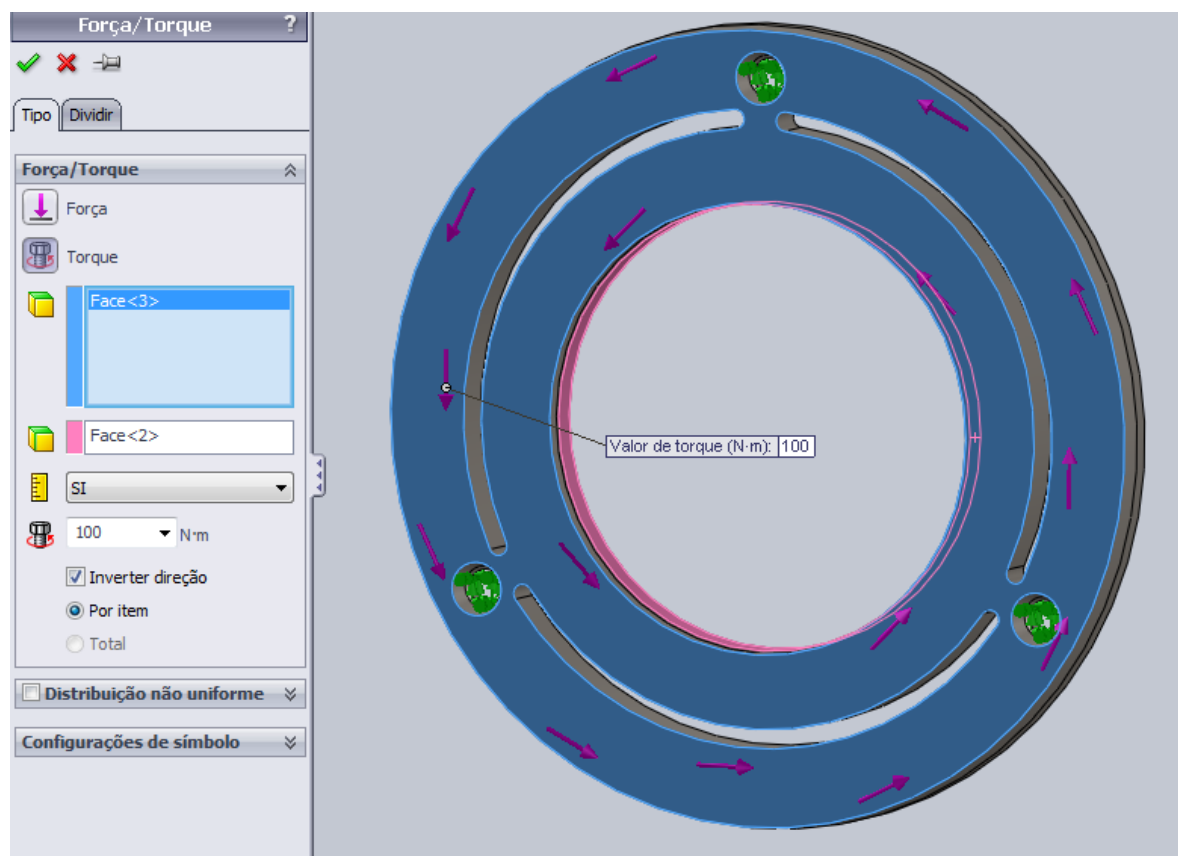


Figura 26: Simulação de torque estático no disco.

Fonte: Autoria Própria

Para execução da simulação optou-se por utilizar malha de densidade grossa com base em curvatura, porque assim como no cubo as regiões de maior interesse na peça ficam com uma malha mais refinada utilizando este parâmetro. Também optou-se por utilizar os parâmetros de malha com base em curvatura padronizados pelo *software*, para esta simulação inicial, devido a geometria simples da peça. A figura 27 mostra a malha do disco e seus parâmetros.

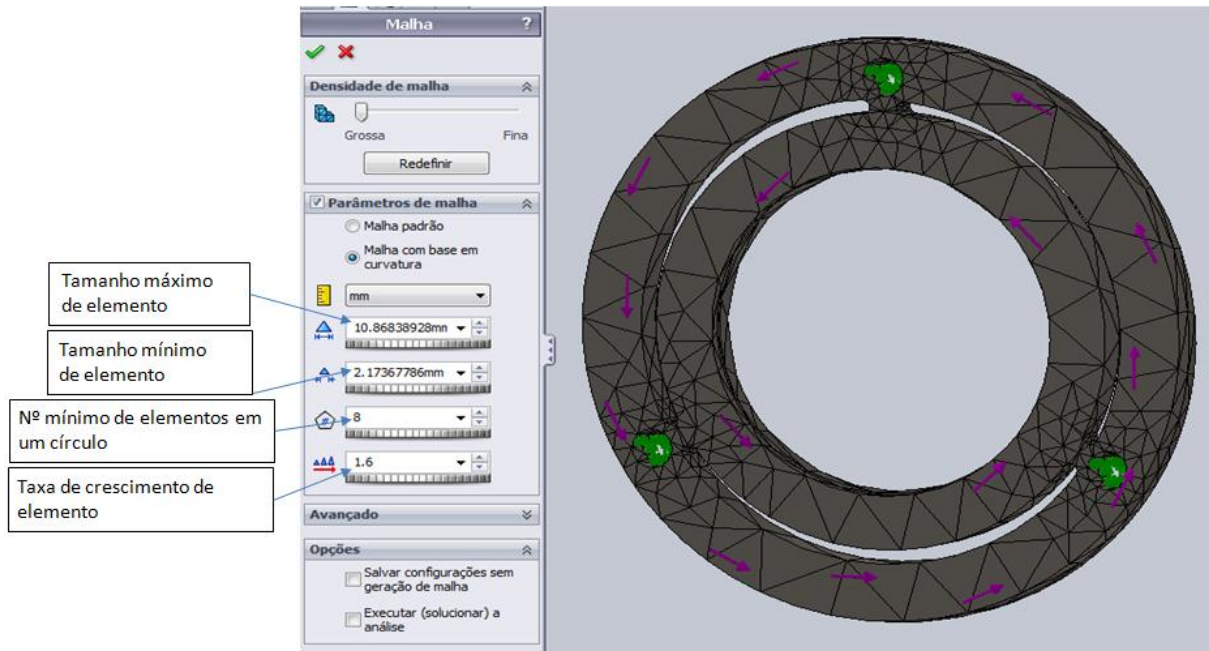


Figura 27: Parâmetros de malha para simulação do disco.

Fonte: Autoria Própria

O material escolhido para a peça também foi o aço AISI 1010 laminado à quente da biblioteca do *software*, com alterações em suas propriedades de acordo com as propriedades do material da peça atual, que é estampada no material JIS SPHC, equivalente ao SAE 1008. Os valores adotados foram de 222 MPa de tensão de escoamento e 338 MPa de tensão última de tração.

Com a execução da simulação, chegou-se aos resultados de tensão de escoamento mostrados na figura 28, com valor máximo de tensão de 17,2 KPa, localizado no interior dos furos dos rebites.

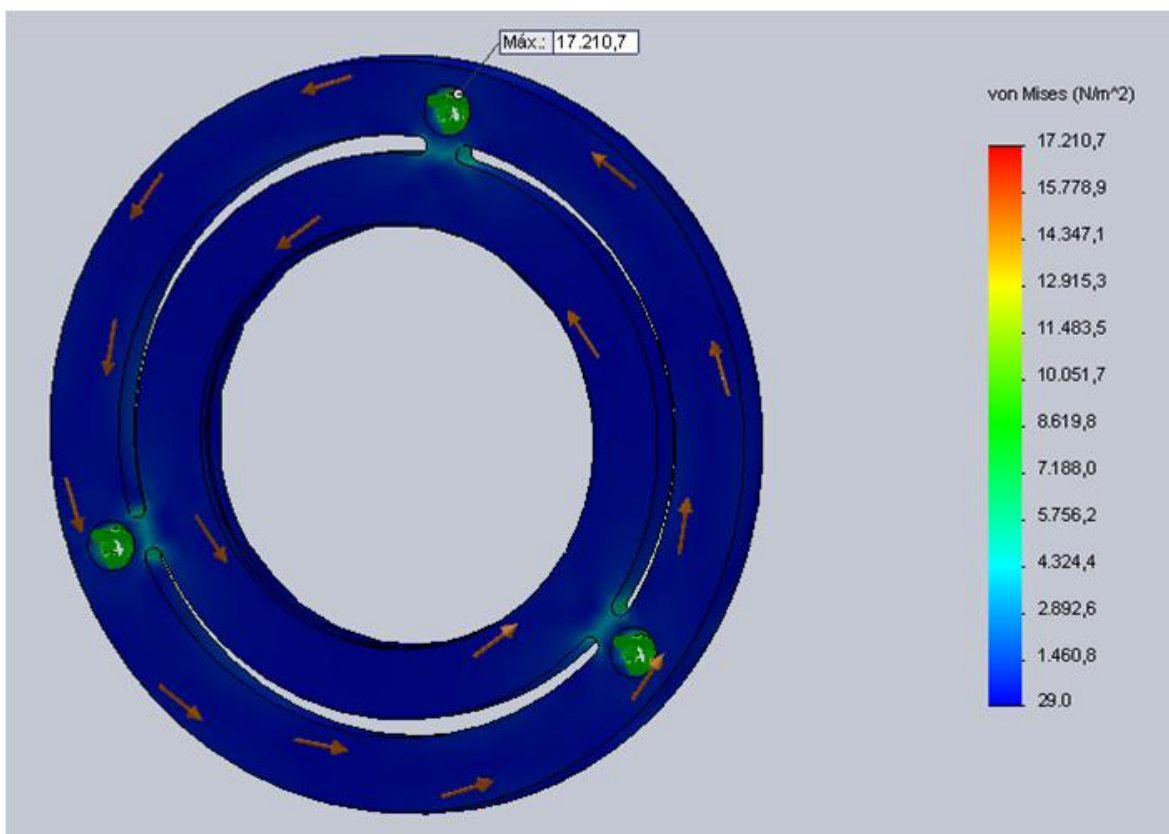


Figura 28: Distribuição de tensão em simulação inicial no disco (Valores de tensão em Pa).

Fonte: Autoria Própria

Apesar de o torque estar distribuído na geometria do componente, o valor encontrado é muito baixo para o torque que está sendo suportado. Por isso, para realizar uma contra prova, o engaste e o carregamento foram invertidos, para verificar se a maneira como o carregamento foi aplicado afetou o resultado.

Assim, o engaste foi feito na face de atrito e o torque foi aplicado nos três furos dos rebites. A figura 29 mostra esta maneira de aplicação do carregamento com seus parâmetros, com 100 N.m de torque.

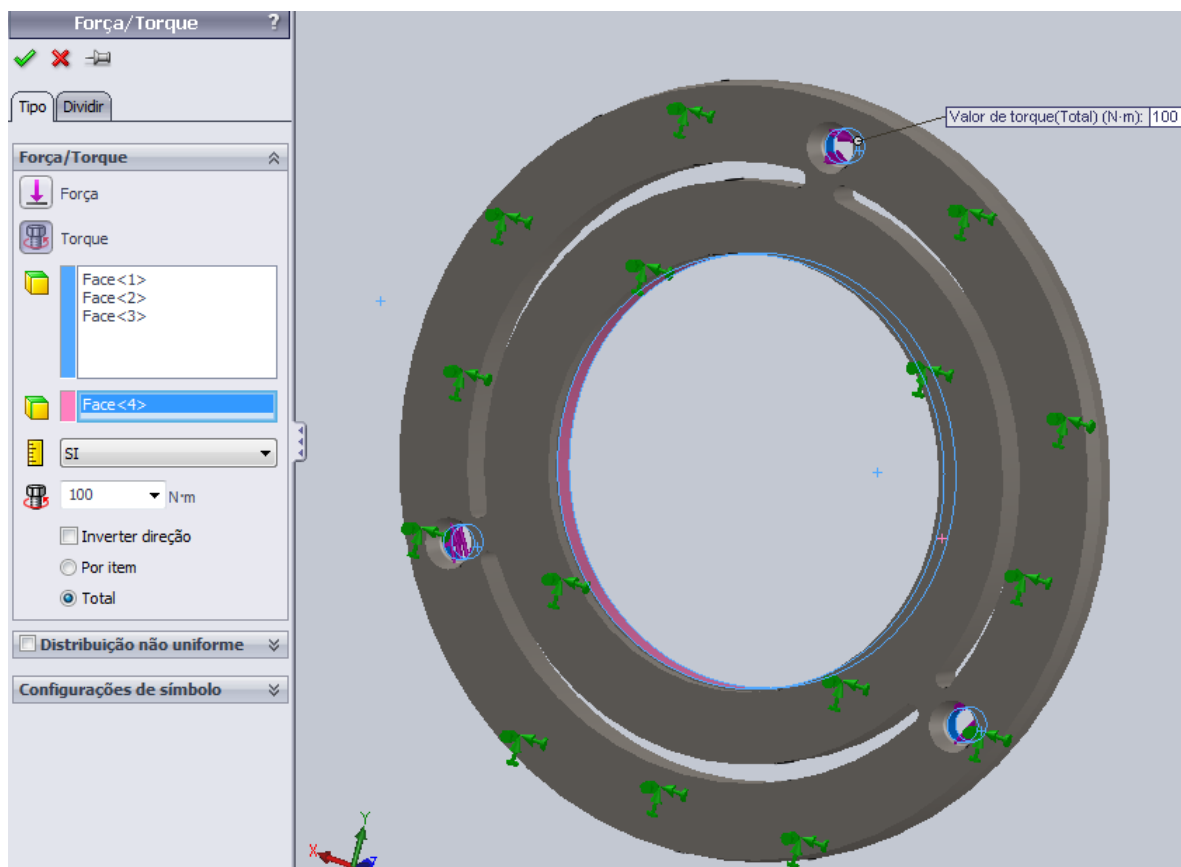


Figura 29: Parâmetros de malha para simulação do disco, alterando engaste e carregamento.

Fonte: Autoria Própria

Com esta nova maneira de realizar a simulação, o resultado obtido foi o mostrado na figura 30, com tensão máxima de 62,3 MPa, e continua localizado no interior dos furos dos rebites.

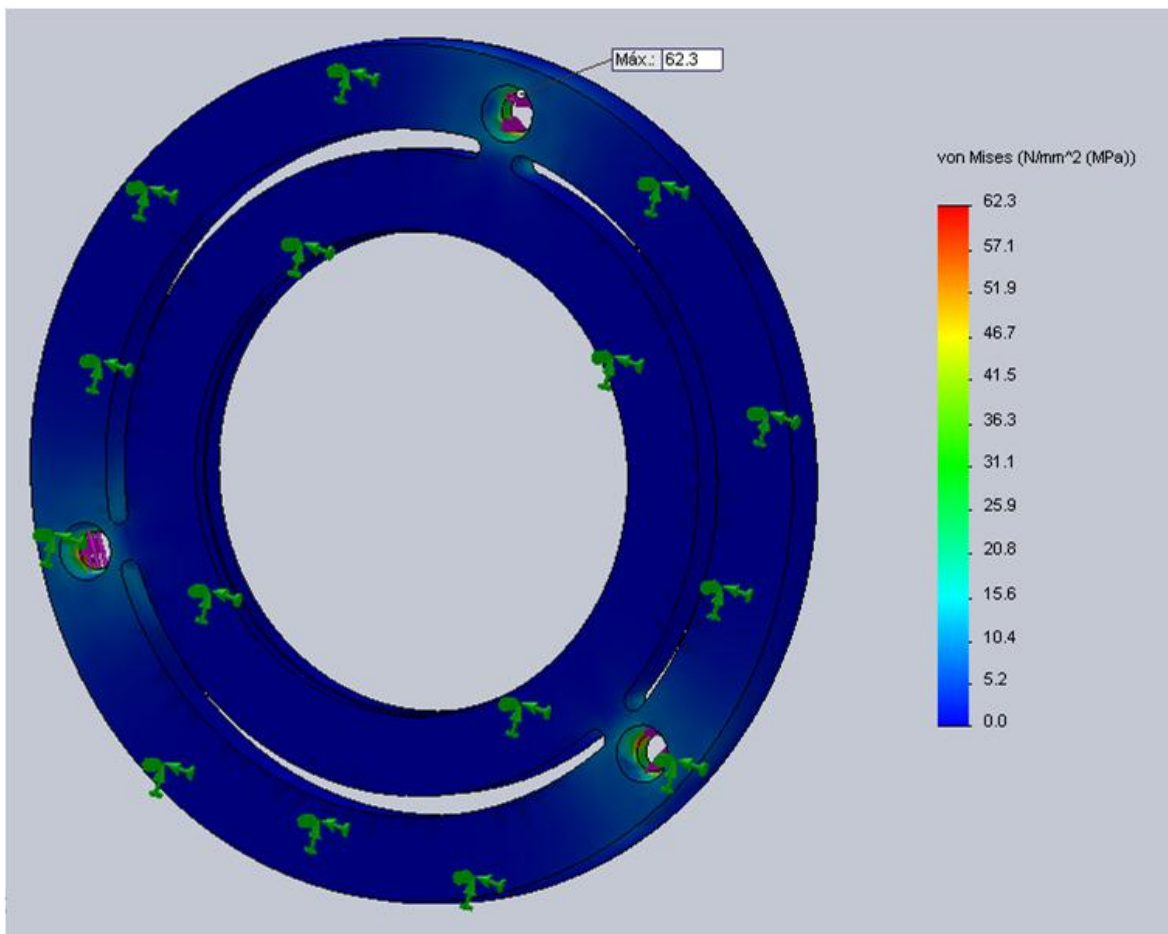


Figura 30: Distribuição de tensão em simulação no disco.

Fonte: Autoria Própria

O novo valor de tensão obtido é mais coerente, tendo esta simulação possivelmente obtido valores próximos da realidade. Com isso, foi aceito que a tensão que o componente deve suportar é de 62,3 MPa. Para um componente como o disco, conforme orientação da empresa, o coeficiente de segurança deve ser de 1,5. Com isso, a tensão de escoamento mínima que o material obtido pela Metalurgia do Pó deve possuir é de 93,5 MPa.

6.3.2 Resistência à Fadiga

Para realizar o estudo de fadiga para o cubo, foi realizada simulação estática com a força normal aos dentes obtida a partir do torque de 11,5 N.m, que é de 2042,9 N. Porém foi considerado a fator de correção, f_c , e o coeficiente de segurança, cs . Como na aplicação de torque a tensão mantém a proporcionalidade em relação ao torque e as respectivas forças resultantes, é possível aplicar estes

fatores diretamente a força. Assim, temos que a força normal aos dentes de fadiga, F_{Nf} , para a simulação estática a ser utilizada no estudo de fadiga é a seguinte:

$$F_{Nf} = 20429 \cdot 0,19 \cdot 2 = 776,3N$$

Os parâmetros da simulação estática, assim como o resultado desta simulação, atingindo um pico de tensão de 9,0 MPa, são exibidos na figura 31.

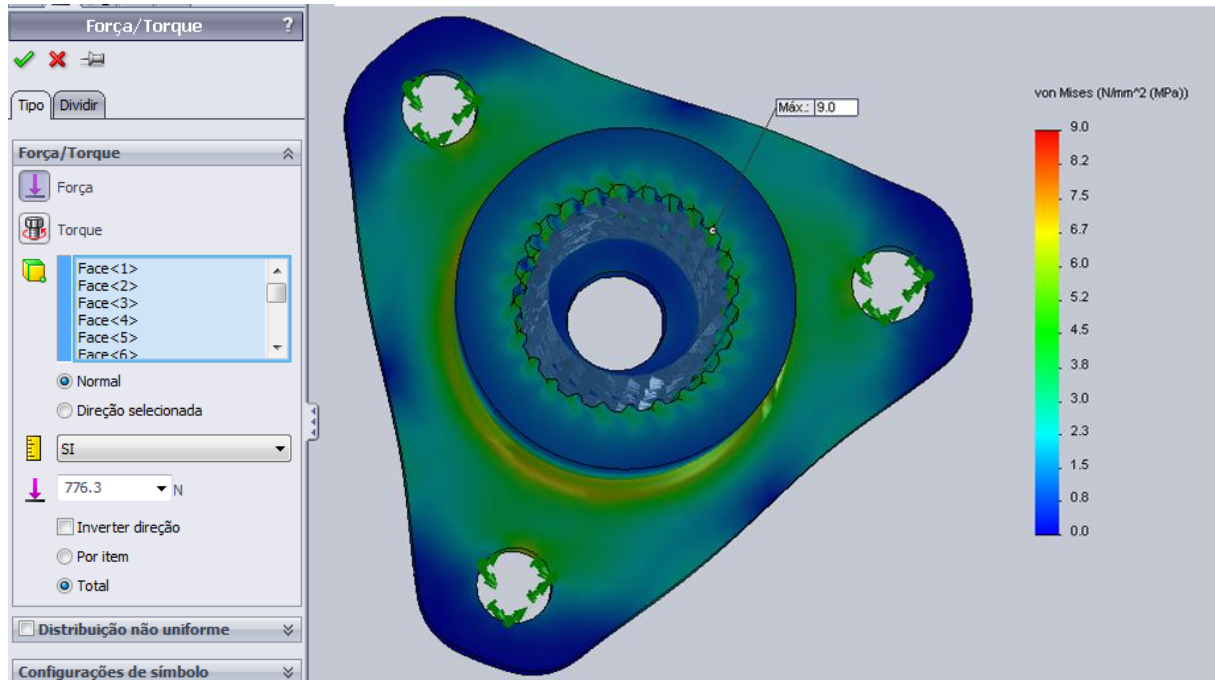


Figura 31: Simulação estática base para simulação de fadiga do cubo.

Fonte: Autoria Própria

Então, realizou-se o estudo de fadiga, utilizando a simulação acima como base, um carregamento do tipo baseado em zero, pois o torque é aplicado em um único sentido variando de zero a 11,5 N.m, conforme determinado anteriormente. O número de ciclos da carga utilizado foi de 10^7 ciclos. Com estes parâmetros, foi realizada a simulação da vida em fadiga do cubo, que mostrou que este número de ciclos está próximo do limite de vida do material, conforme mostrado na figura 32.

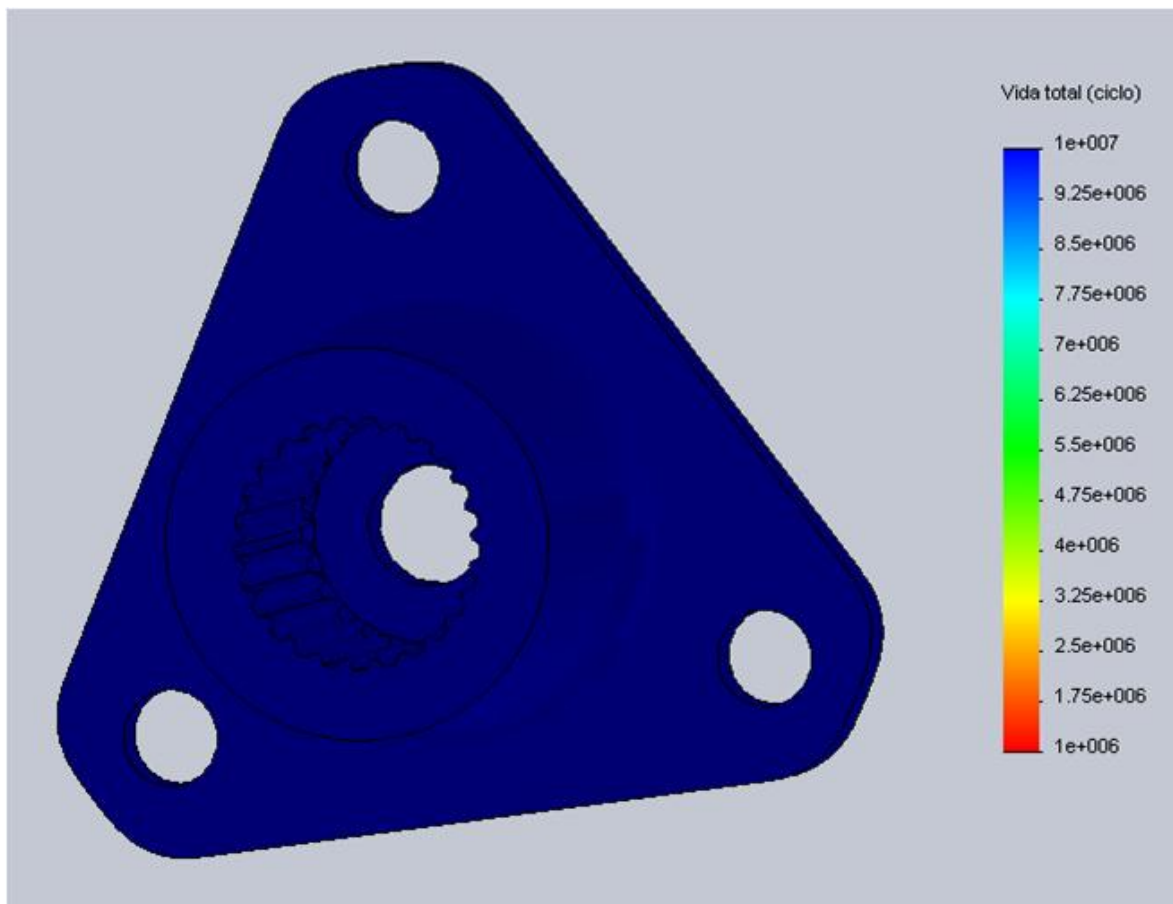


Figura 32: Simulação de vida em fadiga do cubo.

Fonte: Autoria Própria

Para realizar o estudo de fadiga para o disco, foi realizado uma simulação estática semelhante à realizada no cubo. Na simulação do disco, o carregamento aplicado foi diretamente o valor do torque, que para a fadiga é de 11,5 N.m. Considerando o coeficiente de segurança para o disco, que é de 1,5, o valor de torque a ser aplicado no disco é de 17,3 N.m. Os parâmetros da simulação estática, assim como o resultado desta simulação, atingindo um pico de tensão de 10,6 MPa, são exibidos na figura 33.

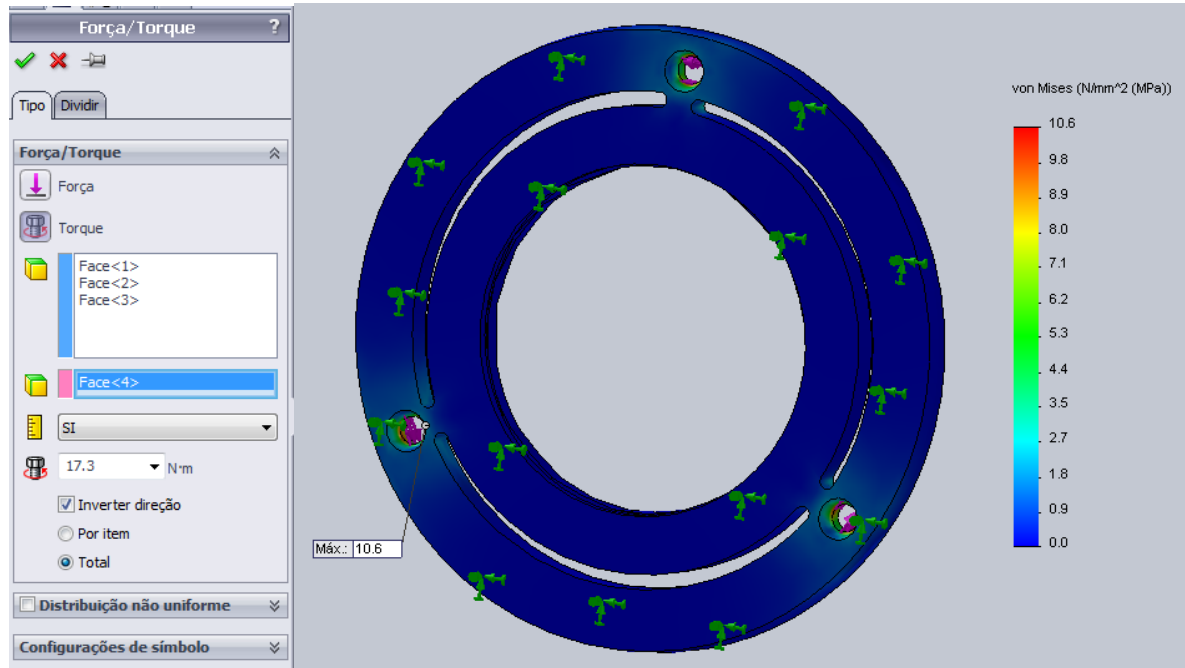


Figura 33: Simulação estática base para simulação de fadiga do disco.
 Fonte: Autoria Própria

Da mesma forma que o cubo, realizou-se o estudo de fadiga para o disco utilizando a simulação estática acima como base, com um carregamento do tipo baseado em zero, com o torque variando de zero a 11,5 N. O número de ciclos da carga utilizado foi de 10^7 ciclos. Com estes parâmetros, o resultado da simulação da vida em fadiga do disco mostrou que este número de ciclos também está próximo do limite de vida do material, conforme mostrado na figura 34.

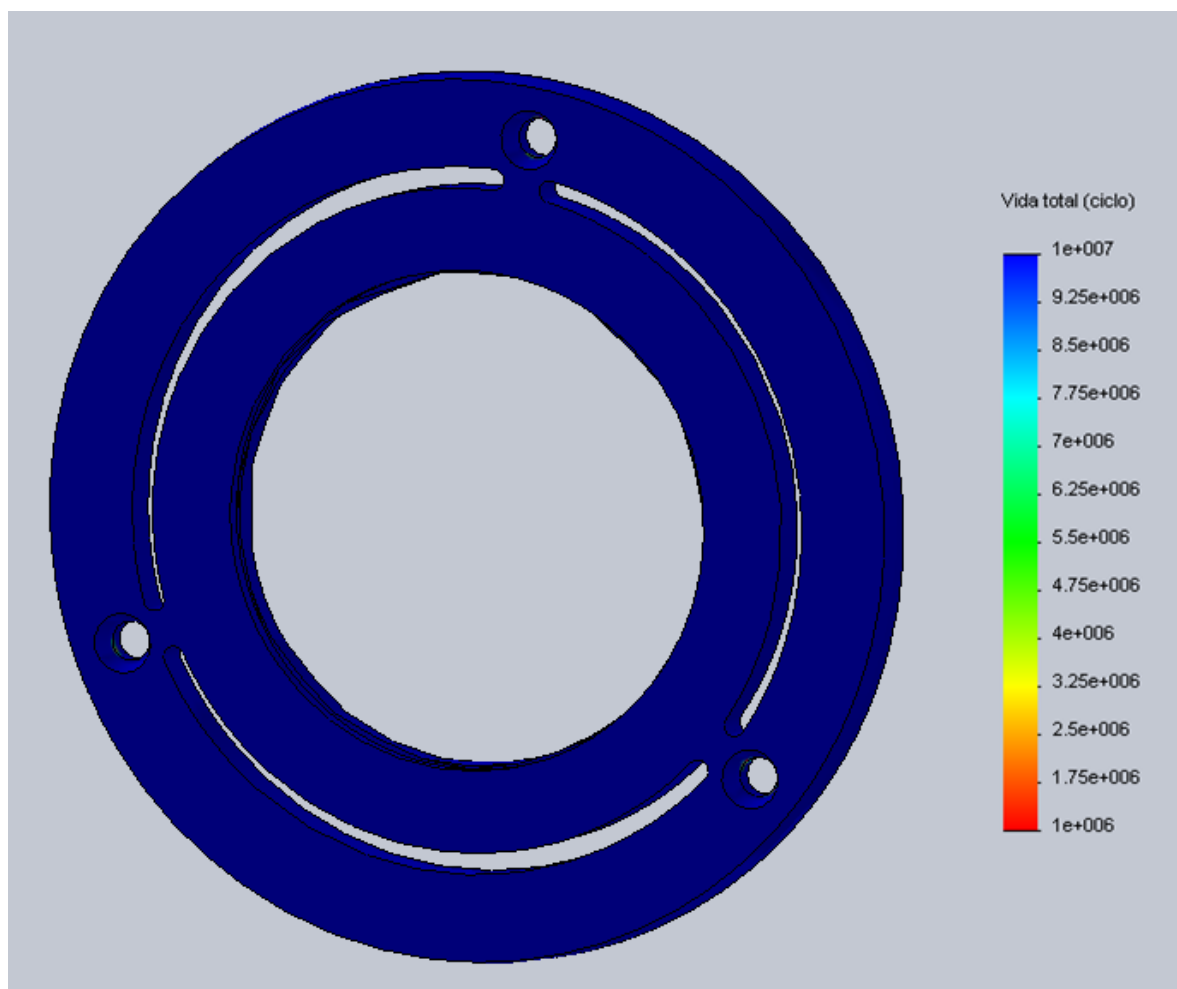


Figura 34: Simulação de vida em fadiga do disco.

Fonte: Autoria Própria

Desta maneira, definiu-se que para o carregamento de fadiga determinado, os componentes devem possuir limite de fadiga igual ou superior as tensões determinadas nas simulações estáticas de base das simulações de fadiga. Em um possível desenvolvimento posterior, estes resultados devem ser validados empiricamente, já que não é possível utilizar um material com as características de materiais produzidos por metalurgia do pó nas simulações de análise de vida.

6.3.3 Resistência a compressão

Na análise de resistência a compressão dos componentes durante o processo de rebtagem, foram determinadas as tensões às quais os componentes são submetidos, quando aplicadas as cargas determinadas anteriormente.

Assim, para o cubo, a carga aplicada em cada rebite é de 31,0kN e a área de apoio é de 29mm². Assim, temos que a tensão de compressão é de 1069,0MPa. A figura 35 mostra a direção de aplicação da força durante a rebitagem.

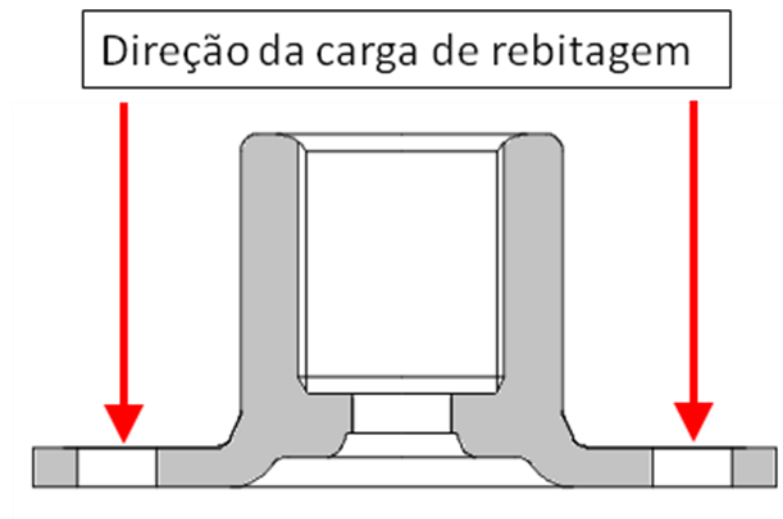


Figura 35: Aplicação da carga de rebitagem no cubo.
Fonte: Autoria Própria

No disco, a carga aplicada em cada rebite é 21,3kN, enquanto que a área de apoio é de 37mm². Assim, a tensão de compressão é de 575,7MPa. A figura 36 mostra a aplicação da carga de rebitagem no disco.

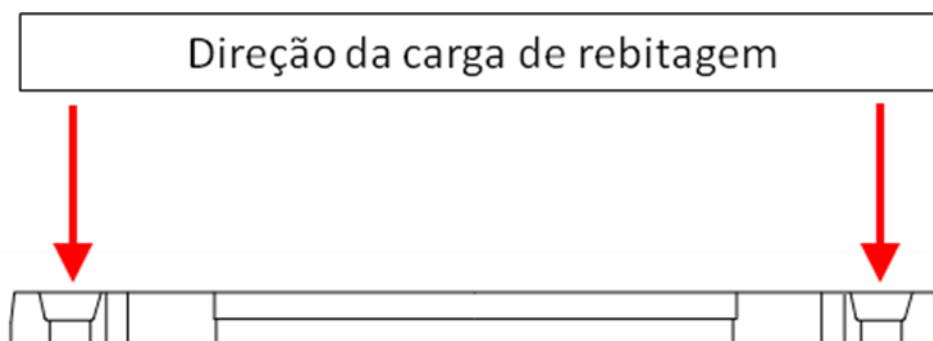


Figura 36: Aplicação da carga de rebitagem no disco.
Fonte: Autoria Própria

6.3.4 Dureza

Uma propriedade importante para o disco de atrito é a dureza da face de atrito, que deve manter a dureza da peça estampada, que é de aproximadamente 67HRB. Como no processo de metalurgia do pó há variação da densidade na espessura e, conseqüentemente, da dureza, que deverá ser garantida apenas na face de atrito, a face com maior densidade deve manter este nível de dureza.

6.4 Análise de Viabilidade Técnica

Ambos os componentes em estudo, são produzidos em aço com baixo teor de carbono, que de acordo com a classificação utilizada na metalurgia do pó se enquadra como F-0000, pois possuem teor de carbono menor que 0,3%, e assim são considerados como ferro, conforme mostrado na tabela 5.

Tabela 5 – Composição de ligas de ferro sinterizadas para componentes mecânicos

Descrição	Nº. MPIF*	Faixas e limites de composição, % (a)			
		C	Ni	Cu	Fe
Ferro	F-0000	0,3 máx.	...	...	97,7/100
Aço	F-0005	0,3/0,6	...	...	97,4/99,7
Aço	F-0008	0,6/1,0	...	...	97,0/99,1
Fe-Cu	FC-0200	0,3 máx.	...	1,5/3,9	93,8/98,5
Aço-Cu	FC-0205	0,3/0,6	...	1,5/3,9	93,5/98,2
Aço-Cu	FC-0208	0,6/1,0	...	1,5/3,9	93,1/97,9
Aço-Cu	FC-0505	0,3/0,6	...	4,0/6,0	91,4/95,7
Aço-Cu	FC-0508	0,6/1,0	...	4,0/6,0	91,0/95,4
Aço-Cu	FC-0808	0,6/1,0	...	6,0/11,0	86,0/93,4
Aço-Cu	...	0,6/0,9	...	18,0/22,0	75,1 mín.
Fe-Cu	FC-1000	0,3 máx.	...	9,5/10,5	87,2/90,5
Fe-Ni	FN-0200	0,3 máx.	1,0/3,0	2,5 máx.	92,2/99,0
Aço-Ni	FN-0205	0,3/0,6	1,0/3,0	2,5 máx.	91,9/98,7
Aço-Ni	FN-0208	0,6/0,9	1,0/3,0	2,5 máx.	91,6/98,4
Fe-Ni	FN-0400	0,3 máx.	3,0/5,5	2,0 máx.	90,2/97,0
Aço-Ni	FN-0705	0,3/0,6	3,0/5,5	2,0 máx.	89,9/96,7
Aço-Ni	FN-0708	0,6/0,9	3,0/5,5	2,0 máx.	89,6/96,4
Fe-Ni	FN-0700	0,3 máx.	6,0/8,0	2,0 máx.	87,7/94,0
Aço-Ni	FN-0705	0,3/0,6	6,0/8,0	2,0 máx.	87,4/93,7
Aço-Ni	FN-0708	0,6/0,9	6,0/8,0	2,0 máx.	87,1/93,4
Aço Infiltrado	FX-1005	0,3/0,6	...	8,0/14,9	80,5/91,7
Aço Infiltrado	FX-1008	0,6/1,0	...	8,0/14,9	80,1/91,4
Aço Infiltrado	FX-2000	0,3 máx.	...	15,0/25,0	70,7/85,0
Aço Infiltrado	FX-2005	0,3/0,6	...	15,0/25,0	70,4/84,7
Aço Infiltrado	FX-2008	0,6/1,0	...	15,0/25,0	70,0/84,4

* Metal Powder Industries Federation; (a) as especificações MPIF exigem que a quantidade total de outros elementos seja menor que 2,0% com exceção do aço infiltrado em que a quantidade total de outros elementos deve ser inferior a 4,0%

Fonte: <http://www.infomet.com.br>

Conforme as propriedades mecânicas determinadas para o cubo, o componente deve possuir tensão de escoamento mínima de 120 MPa, e um limite de fadiga de pelo menos 9,0 MPa.

Para o disco, conforme as propriedades mecânicas determinadas, a tensão de escoamento deve ser de pelo menos 93,5 MPa, o limite de fadiga deve ser de no mínimo 10,6 MPa, e a dureza na face de atrito deve ser de aproximadamente 67 HRB.

A tabela 6 relaciona as propriedades mecânicas com a densidade do sinterizado, e utiliza a norma MPIF 35 como referência, e foi utilizada para determinar a densidade a partir dos requisitos de propriedades mecânicas.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas típicas de ferro e aço sinterizado

Nº. MPIF	Estado	Densidade g/cm ³	Resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento % em 25 mm	Limite fadiga		Resistência ao choque		Dureza aparente
			kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa		kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	J	
F-000	Sinterizado	inf. 6,0	11,2	110	7,7	75	2,0	4,2	40	0,4	4,1	10RH
	Sinterizado	6,4/6,8	16,8	165	11,2	110	5	6,3	60	1,3	13	80RH
	Sinterizado	7,2/7,6	28,0	275	18,7	180	15	10,5	105	3,4	34	30RB
F-0005	Sinterizado	inf. 6,0	12,6	125	10,5	105	1,0	4,9	45	0,34	3,4	5RB
	Sinterizado	6,4/6,8	22,4	220	16,1	160	2,5	8,4	85	0,69	6,8	45RB
	Sinterizado e trat. termic.	6,4/6,8	42,0	415	39,9	395	0,5	16,1	155	...	...	100RB
	Sinterizado e trat. termic.	6,8/7,2	30,1	295	19,6	195	3,5	11,2	110	1,24	12	60RB
F-0008	Sinterizado	inf. 6,0	20,3	200	17,3	170	0,5	7,7	75	0,27	2,7	35RB
	Sinterizado	6,4/6,8	29,4	290	25,2	250	1,5	9,8	110	0,48	4,7	65RB
	Sint. e t.t.	6,4/6,8	51,8	510	...	...	<0,5	19,6	195	...	...	25RC
	Sinterizado	6,8/7,2	39,9	395	28,0	275	2,5	15,4	150	0,87	9,5	75RB
	Sint. e t.t.	6,8/7,2	65,8	650	63,7	625	<0,5	25,2	245	...	...	30RC
FC-0200	Sinterizado	6,0/6,4	16,1	160	11,9	115	2,5	6,3	60	7,6	75	80RH
	Sinterizado	6,8/7,2	25,9	355	16,1	160	7	9,8	95	2,35	23	30RB
FC-0205	Sinterizado	6,0/6,4	28,0	275	23,2	235	1	10,5	105	0,43	4,7	35RB
	Sinterizado	6,8/7,2	43,2	425	31,5	310	3	16,3	160	1,31	13,0	75RB
	Sint. e t.t.	6,8/7,2	70,0	690	66,5	655	<0,5	26,6	260	...	...	35RC
FC-0208	Sinterizado	6,0/6,4	31,5	310	28,7	280	<0,5	11,9	115	0,41	4,1	50RB
	Sint. e t.t.	6,0/6,4	38,5	380	...	...	<0,5	14,7	145	...	...	25RC
	Sinterizado	6,8/7,2	56,0	550	39,9	395	1,5	21,0	210	1,10	11	80RB

Fonte: <http://www.infomet.com.br>

Como é possível observar na tabela, as informações não correlacionam precisamente a densidade com as propriedades mecânicas, numerando as propriedades para uma faixa de densidades que podem possuir valores próximos aos mencionados.

Para o cubo, a partir da análise da tabela, é possível determinar que a densidade deve ser em torno de 7,2 g/cm³ nas regiões da peça com maior solicitação mecânica.

Para o disco, é possível determinar que a densidade na face de atrito deve ser próxima a densidade teórica do aço, em torno de 7,8 g/cm³, o que é possível fazendo com que esta face seja a região de maior densidade na peça. O restante da peça, para atender aos requisitos mecânicos deve ter uma densidade mínima de 6,4 g/cm³.

Porém, tecnicamente, o que impossibilita a produção dos componentes por metalurgia do pó é o processo de rebitagem, pois sabe-se que a tenacidade a fratura dos materiais obtidos por metalurgia do pó não suportam este tipo de processo com

os esforços determinados anteriormente. Não há como mensurar valores para a tenacidade a fratura sem a realização de análises empíricas, pois isto depende das características do material obtido, como por exemplo, a morfologia dos grãos e poros formados. O fornecedor garantiu, baseado em seu *know how* com a tentativa de desenvolvimento de peças semelhantes, que não é possível obter material que resista a este esforço seguindo as especificações de material e geometria exigidos para estas peças, mantendo o processo competitivo. Obteve-se também a informação de como são as peças de aplicação semelhante que são produzidas por metalurgia do pó, e são peças que não passam pelo processo de rebitagem como as peças em estudo.

Desta maneira, não é viável tecnicamente um processo de metalurgia do pó competitivo economicamente, e sem alterações significativas no projeto dos componentes que não afete outros componentes do conjunto.

6.5 Determinação do Método e Parâmetros do Processo de Metalurgia do Pó

O processo de metalurgia do pó para produção dos componentes ficou definido pelo fornecedor, que reservou-se a não fornecer as informações para preservar o conhecimento da empresa sob sigilo industrial. Com isso, o trabalho foi focado no projeto dos componentes para possibilitar este processo, não sendo um item de grande enfoque os parâmetros do processo, sendo depositada no fornecedor a convicção de que o estudo foi realizado com o objetivo de atender os requisitos de projeto estabelecidos.

Assim, foi determinado que o processo, para ambos os componentes, deve ser composto de uma compactação uniaxial e sinterização, seguidos de um processo de calibração, não havendo configurações não usuais para alguma das etapas do processo.

6.6 Orçamento do Processo de Metalurgia do Pó

Com base no processo a ser adotado para obtenção dos componentes com as propriedades mecânicas desejadas, foi estimado o custo de produção de cada uma das peças. O ferramental de compactação é de responsabilidade do fornecedor, devido ao *know-how*, o ferramental não é comercializado e é considerado como

custo de desenvolvimento do fornecedor. Apenas uma parte do ferramental de compactação, matriz e punções, possuem uma vida útil em torno de 250.000 peças e, com isso, o custo destes componentes do ferramental acaba sendo amortizado na produção.

Apesar da inviabilidade técnica, este estudo econômico básico foi realizado, pois como acredita-se ser possível o desenvolvimento de soluções para o problema que inviabilizou tecnicamente, é interessante saber se é vantajoso investir neste desenvolvimento, caso possível. Considerando isto, e considerando dois volumes de produção, 300.000 e 1.000.000 de unidades ano, foram orçados os componentes, a fim de se obter uma orientação a respeito do potencial econômico de se aplicar a metalurgia do pó na fabricação dos componentes. A tabela 7 mostra os orçamentos dos componentes, considerando os dois volumes anuais.

Tabela 7 – Orçamentos dos componentes

Componente	Custo (R\$)	
	Volume Anual	
	300.000	1.000.000
Cubo	3,65	2,90
Disco	3,72	3,00

Fonte: Autoria Própria

6.7 Análise de Viabilidade Econômica

Como o custo do ferramental que é repassado ao cliente está incluso no custo peça, de maneira que há uma amortização contínua ao longo da vida do ferramental, a análise de viabilidade econômica acaba sendo simplificada, de maneira que o custo peça apenas deve ser mais baixo que o custo peça atual, e a redução de custo deve retornar o investimento em desenvolvimento necessário para implementar esta mudança de processo de fabricação.

Para o cubo, o custo peça atual é de R\$1,90, e sendo assim, não é viável economicamente a implementação do projeto, pois mesmo com um volume de 1.000.000 de peças ao ano o custo ainda é significativamente mais elevado para o processo de metalurgia do pó.

Com o disco, o custo atual da peça é de R\$2,10, sendo assim, este componente também é inviável economicamente, havendo aumento significativo no custo para produzi-lo por metalurgia do pó.

7 CONCLUSÕES

Na análise de viabilidade técnica, ocorreu a determinação de que a grande dificuldade em alterar o processo de fabricação dos componentes para metalurgia do pó está no processo de montagem dos componentes, através de rebitagem, pois as peças obtidas pela metalurgia do pó não apresentam tenacidade à fratura suficiente para resistir ao carregamento durante a rebitagem. Inicialmente imaginava-se que o grande desafio seriam os esforços de funcionamento, porém descobriu-se que com um processo de metalurgia do pó sem procedimentos especiais ou muito específicos é possível produzir os componentes com as propriedades mecânicas desejadas.

Apesar da inviabilidade técnica, o estudo de viabilidade econômica continuou sendo interessante, tanto para uma possível aplicação futura nos componentes em estudo, quanto para conhecimento a ser aplicável a outros componentes que possuam potencial de serem produzidos por este processo de fabricação. Porém, também não houve viabilidade econômica, ficando os custos da metalurgia do pó mais altos que dos processos atuais. Conclui-se que os processos atuais, por conformação mecânica, estão com custos competitivos e matéria-prima otimizada, e o fato de as peças não necessitarem de usinagem posterior a conformação mecânica para obtenção da peça final, tornam o processo de metalurgia do pó não competitivo economicamente.

Assim, definiu-se que não há vantagens em seguir com a pesquisa e desenvolvimento para produzir os componentes em estudo pela metalurgia do pó, havendo dificuldades técnicas e econômicas que inviabilizam este projeto.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 140**: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. West Conshohocken, 2002. 21 p.

BRESCIANI, Ettore, Filho; ZAVAGLIA, Cecília A. C.; BUTTON, Sérgio T.; GOMES, Edson; NERY, Fernando A. C. **Conformação Plástica dos Metais**. 4 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991. 385 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó: técnica e produtos**. 4 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. 326 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 1 v. 266 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 2 v. 315 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 3 v. 388 p.

COSTA, Ennio Cruz da. **Compressores**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 172 p.

DALY, Steven. **Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems**. 1 ed. Oxford: Elsevier Linacre House, 2006. 362 p.

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1 ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. 320 p.

INFOMET. **Handbook – Aços & Ligas – Aços e Ferros Fundidos - Aços Sinterizados – 3 – Tipos de ferro e aços sinterizados, suas propriedades e aplicações**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=131> Acesso em: 11 junho de 2015.

PALLINI, Marco Antônio Trincha; CARVALHO, Márcio Antônio Teixeira de. **A Redução de Custo na Indústria Automotiva através do Sinterizado**. SAE Brasil, 2006. 6 p.

PC MAGNUM. **Automobile Air Conditioner**. Disponível em: <http://pcmagnum.blogspot.com.br/2010/03/automobile-air-conditioner.html> Acesso em: 23 julho 2014.

PEASE III, Leander F.; WEST, William G. **Fundamentals of Powder Metallurgy**. 1 ed. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 2002. 452p.

RECOMPÓ. **Comparação de Resistência Mecânica Mat. Convencional VS. M/P.**
Disponível em:
http://www.recompo.com.br/index.php?option=com_content&task=section&id=8&Itemid=13 Acesso em: 06 maio 2013.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização.** 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003. 219 p.

VW CAMINHÕES E ÔNIBUS. **Características Construtivas e Informações do Produto – Sistema de Ar Condicionado.** Disponível em:
http://www.vwcaminhoeseonibus.com.br/site/encarrocador/Delivery_Worker/173.htm
Acesso em: 10 março de 2014.