



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MECÂNICA DAS JOIAS: ESTUDO ESTRUTURAL
APLICADO À CONCEPÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO**

FELIPE ANDRÉ SCHWAB

PORTO ALEGRE
2016

FELIPE ANDRÉ SCHWAB

**MECÂNICA DAS JOIAS: ESTUDO ESTRUTURAL
APLICADO À CONCEPÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design com ênfase em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Branca Freitas de Oliveira

PORTO ALEGRE

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Schwab, Felipe André
MECÂNICA DAS JOIAS: Estudo Estrutural Aplicado à
Concepção e ao Desenvolvimento / Felipe André Schwab.
-- 2016.
102 f.

Orientador: Branca Freitas de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Joias. 2. Projeto. 3. Análise Estrutural. 4.
Elementos Finitos. I. de Oliveira, Branca Freitas,
orient. II. Título.

Felipe André Schwab

MECÂNICA DAS JOIAS: ESTUDO ESTRUTURAL APLICADO À CONCEPÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, dezembro de 2016.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Branca Freitas de Oliveira (Orientadora)

Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

Prof^a. Dr^a. Jocelise Jacques de Jacques

Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem

Departamento de Mineralogia e Petrologia / UFRGS

Prof^a. Dr^a. Vanessa Fátima Pasa Dutra

Departamento de Engenharia Civil / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo e confiança nesta e em outras jornadas.

À minha orientadora, professora Branca Freitas de Oliveira, pela dedicação com a qual me guiou neste caminho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Design pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores membros da banca, pelas contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos demais professores com quem tive a honra de ter aula durante minha trajetória acadêmica.

Aos colegas da UFRGS que apoiaram e contribuíram para com este trabalho, especialmente a Eliana Paula Calegari e Antônio Sarti pelo apoio e suporte.

À fundação CAPES, órgão financiador para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos que, da sua forma, acompanharam essa jornada e contribuíram, seja com conhecimento ou com apoio nas horas difíceis.

RESUMO

A criação e confecção de joias, objetos de adorno, remete aos primórdios da humanidade. Ao longo da história as técnicas construtivas foram aprimoradas, porém os métodos produtivos do ramo joalheiro ainda hoje possuem forte caráter empírico de desenvolvimento. Nesse contexto, a presente pesquisa explora a possibilidade de simulação e avaliação do comportamento mecânico da joia, aplicada em etapas que precedem à produção. Busca-se como a análise estrutural por elementos finitos pode auxiliar o designer na avaliação de joias em processos de pré-fabricação. Para isso tem-se a criação dos corpos de prova gerados pela modelagem virtual, através do software Rhinoceros 3D. Os corpos de prova são exportados para o software Abaqus CAE, no qual são configuradas as propriedades do material, condições de carregamento e de suporte, simulando aspectos do uso diário da joia. Como material para simulação, são analisados aqueles mais utilizados no segmento, o ouro, a prata e o latão. Os resultados da simulação gerados no *Abaqus CAE* permitem avaliar as tensões geradas sobre o modelo, bem como os deslocamentos e deformações. Assim são identificados pontos frágeis na estrutura ou mesmo onde pode ter uma otimização da quantidade de material utilizado para cada joia, reavaliando a necessidade de aumentar ou reduzir o uso do material, buscando o equilíbrio estrutural do qual a joia necessitará. Os resultados obtidos comprovam que o método converge para uma importante ferramenta que proporciona dados sobre cada projeto a ser desenvolvido. Esses dados geram uma visão analítica onde as empresas podem definir qual a prioridade para cada projeto através de índices precisos, o que reduz a taxa de erro por projeto, auxilia no consumo adequado de matéria-prima, gerando economia de tempo e dinheiro.

Palavras-chaves: joias, projeto, análise estrutural, elementos finitos.

ABSTRACT

The creation and production of jewelry, adornment objects, refers to the beginnings of humanity. Throughout the history, the construction techniques were improved, however the production methods of the jewelry industry today still have a strong empirical development and production. With this premise, the present research explores the possibility of simulation and evaluation of mechanical behavior for jewelry, in stages that are prior to production. With the application of external loads, the behavior of the jewelry through situations that may occur during the daily use can be analyzed. To create the study object it is used the software Rhinoceros 3D for make the virtual models. In the simulations the most used materials in the jewelry segment are analyzed, as gold, silver and brass. The Finite Element software Abaqus CAE is used for the structural analysis. The results show that the method is an important tool to provide data about the development of each project. These data give an analytical perception in which companies can define projects priorities through precise indexes, reducing error rates, helping in a suitable consumption of raw materials, saving time and money.

Keywords: jewelry, project, structure analysis, finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Problemas no processo de produção. 208 empresas do ramo joalheiro brasileiro participaram e assinalaram mais de uma opção, por isso valores superam os 100%.....	18
Figura 2 – Processo de discretização pelo método dos elementos finitos; À esquerda o modelo geométrico e à direita o modelo discretizado em malha composta por elementos finitos triangulares.	27
Figura 3 – Curva de tensão por deformação de um dado material dúctil, destacando pontos importantes na transição da fase elástica, para a plástica e posterior ruptura.	33
Figura 4 – Mix de produtos de ramo joalheiro no Brasil, 208 empresas participaram e assinalaram mais de uma opção, por isso os valores superam os 100%.	35
Figura 5 – Processos de fabricação envolvidos na indústria joalheira da matéria prima ao setor de correntaria, estamparia e fundição por cera perdida.....	42
Figura 6 – Matriz em aço temperado, serve como molde para o metal laminado que é encaminhado ao processo de estamparia. À direita, em detalhe, a matriz da medalha de Nossa Senhora Aparecida, utilizada na confecção de escapulários em metal.	43
Figura 7 – Processo de trefilagem, cinco fieiras adaptadas na máquina para a redução gradual da espessura do fio de metal.	44
Figura 8 – Ciclo do processo de fundição por cera perdida.	45
Figura 9 – Cravações comumente utilizadas. (A) Cravação inglesa; (B) Cravação com garras; (C) Cravação pavê; (D) Cravação trilho; (E) Cravação invisível; (F) Cravação tensão.....	51
Figura 10 – Meia aliança, utilizada como corpo de prova nesta pesquisa, obtida por modelagem em mm no <i>software Rhinoceros 3D</i>	57

Figura 11 – Processos de exportação disponíveis no <i>software Rhinoceros 3D</i> , indicando a extensão selecionada IGES (*.igs,*.iges) na opção <i>SolidWorks solids</i>	58
Figura 12 – (A) Passos para a configuração da simulação; (B) Configuração das propriedades; (C) Aplicando os meios externos de atuação; (D) Gerando a malha.	59
Figura 13 – (I.P.) Face inferior da superfície interna fixa, denominado interno parcial; (I.T.) Superfície interna totalmente fixa, denominada interno total;.....	61
Figura 14 – Resultados da análise exploratória obtidos no <i>software Abaqus</i> . Anéis a esquerda mensuram tensões de von Mises (MPa); Anéis a direita mensuram deslocamentos em magnitude (mm).	63
Figura 15 – Transposição das amostras de mercado reais para o meio digital através do <i>software Rhinoceros 3D</i>	67
Figura 16 – Constância e precisão no dimensionamento dos granitos nos corpos de prova AM2 e AM3, em contraponto à falta dessas características em AM1 e AM4, devido a ajustes manuais	69
Figura 17 – Modelagem digital, no <i>software Rhinoceros 3D</i> , das amostras indicadas por bibliografia com base em Rosseti (2011). À esquerda as indicações para a configuração da cravação e dimensionamento do corpo do anel.	70
Figura 18 – Modelagem digital, no <i>software Rhinoceros 3D</i> , amostra AL1. Detalhamento das dimensões utilizadas na vista frontal e de topo.	71
Figura 19 – Processo de mensuração da área correspondente a palma da mão e a região de uso do anel, em amarelo, tomando como base o estudo gráfico dimensional de Paschoarelli et al (2010). DM corresponde aos valores de dimensionamento da mão.....	74
Figura 20 – Cargas, representadas pelas setas rosas, aplicadas na região da cravação, (R.C.); Cargas, representadas pelas setas rosas, aplicadas na região oposta a cravação, (R.O.C.).	75
Figura 21 – Construção dos sólidos que atuarão como suporte ao anel. À esquerda a modelagem com base nas radiografias de Cadogan (2016) e à direita o corte A - A' secciona a região de interesse à análise, próxima ao anel.	77
Figura 22 – Condições de suporte aplicadas à estrutura. À esquerda, a face onde foi determinado o engaste e à direita a restrição de movimento no eixo z, aplicada	

na face anterior e posterior das estruturas osso e músculos/tendões, em vermelho.....	77
Figura 23 – Configuração de interação entre as estruturas. À esquerda, criando superfície interna da estrutura músculos/tendões para aplicação de contato, em vermelho e à direita definindo a relação <i>master surface</i> na superfície interna do anel, em vermelho e a <i>slave surface</i> na superfície externa da estrutura músculos/tendões, em roxo.	78
Figura 25 – Análise aplicada em AM1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	82
Figura 26 – Análise aplicada em AM2; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	83
Figura 27 – Análise aplicada em AM3; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	84
Figura 28 – Análise aplicada em AM4; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	85
Figura 29 – Análise aplicada em AB1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	86
Figura 30 – Análise aplicada em AB2; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	87
Figura 31 – Análise aplicada em AL1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de	

prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	88
Figura 32 – Fluxo de distribuição da tensão no corpo de prova AB2, caso D. A tensão inicia na região da cravação, em azul e verde, no detalhe abaixo e na região oposta a cravação, em azul, acima.....	90
Figura 33 – Mensuração da deformação em mm, caso C. Em cinza, anel na posição inicial; em cores, posição final do anel após a aplicação da carga.....	91
Figura 34 – Modelagem digital, no <i>software Rhinoceros 3D</i> , amostra AI1.....	93
Figura 35 – Análise aplicada em AI1; Anéis predominantemente azuis mensuram tensões de von Mises (MPa); Anéis com maior gama de cores mensuram deslocamentos em magnitude (mm).....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades mecânicas do ouro branco, prata e latão utilizados nesta pesquisa, necessárias para a análise de cargas.	37
Quadro 2 – Dados de reservas mundiais, produção mundial, maior produtor mundial, porcentagem de uso e reciclagem nos Eua dos metais: ouro, prata, cobre e zinco, amplamente utilizados no ramo joalheiro.	38
Quadro 3 – Resultados da análise exploratória, obtidos através do <i>software Abaqus</i> , para as diversas situações de contorno. Os índices destacam os máximos valores de tensão e de deformação obtidos em cada caso.	64
Quadro 4 – Volumes mensurados para os corpos de prova.	72
Quadro 5 – Configuração da amplitude do carregamento em função do tempo. Amplitude máxima atingida no tempo 1 segundo, retornando amplitude mínima no tempo 2 segundos.	73
Quadro 6 – Propriedades mecânicas para osso cortical, tecido muscular esquelético e tendões.	76
Quadro 7 – Índices máximos de deslocamentos obtidos, corpo de prova AM4 no caso C, variação do índice de refinamento de malha em 0,6mm, 1,1mm e 1,6mm.	79
Quadro 7 – Resultados obtidos nas análises geradas pelo <i>software Abaqus</i> , índices destacam os máximos valores de tensão.	89
Quadro 8 – Resultados obtidos nas simulações. Os índices destacam os máximos valores de tensão e deformação.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Amostra Indicada por Referência Bibliográfica
Ag	Prata
AI	Amostra Indicada
AL	Amostra Limiar
AM	Amostra de Mercado
Au	Ouro
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
g/cm ³	Grama por Centímetro Cúbico
GPa	Gigapascal
IBGM	Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
k	Quilate (do inglês, Karat)
kg	Kilograma
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
ton.	Tonelada
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

Agradecimentos	5
Resumo	6
Abstract	7
Lista de Figuras	8
Lista de Quadros	12
Lista de Abreviaturas e Siglas	13
Sumário	14
Capítulo 1	16
Introdução	16
1.1. Delimitação do Tema e Definição do Problema.....	19
1.2. Objetivo Geral.....	20
1.2.1 Objetivos Específicos.....	20
1.3. Justificativa	21
Capítulo 2	24
Fundamentação Teórica.....	24
2.1. Engenharia e Análise Estrutural	24
2.1.1 Hipóteses Simplificadoras Quanto ao Material, Geometria, Solicitações e Condições de Suporte.....	29
2.2. Propriedades Mecânicas Envolvidas.....	31
2.3. Propriedades do Ouro, da Prata e do Latão	34
2.4. Dados e Impactos na Extração dos Metais Utilizados.....	37
2.5. Processos Produtivos da Indústria Joalheira.....	41
2.5.1 Fundição por Cera Perdida	45
2.6. Sistemas CAD/CAM para a Joalheria.....	48
2.7. Pontos Mais Frágeis aos Carregamentos, as Cravações.....	51

2.7.1	Considerações:	54
	Metodologia de Pesquisa	55
3.1.	Preparando o corpo de prova	57
3.2.	Configurando a análise.....	58
3.3.	Resultados Preliminares.....	62
3.4.	Considerações Preliminares.....	64
	Capítulo 4	65
	Refinamento do Método	65
4.1.	Detalhamento dos corpos de prova.....	65
4.2.	Refinamento das condições de contorno	72
4.3.	Interação entre as estruturas.....	78
4.4.	Refinamento de Malha	79
4.4.1	Considerações:	80
	Capítulo 5.....	81
	Resultados e Considerações Finais	81
5.1.	Resultados.....	81
5.2.	Considerações Finais	96
	Referências Bibliográficas	98

INTRODUÇÃO

“Desde o começo da civilização humana, o uso de adereços está intimamente ligado ao homem”. (A CRAVAÇÃO, 2010, p. 43). Seja na pré-história, confeccionadas a partir de ossos, pedras e outros materiais rudimentares ou com o aperfeiçoamento na utilização de gemas e metais ao longo do período da idade antiga, percebe-se o fascínio exercido pelas joias sobre a humanidade há milênios. Para Corbetta (2007) o homem considerou seus ornamentos como importantes elementos simbólicos da sua condição social e através dos quais é possível conhecer a história das civilizações com a influência que tiveram fatos políticos, econômicos e sociais, sem deixar de lado o simbolismo e a religião, aspectos da humanidade intermediados pela arte.

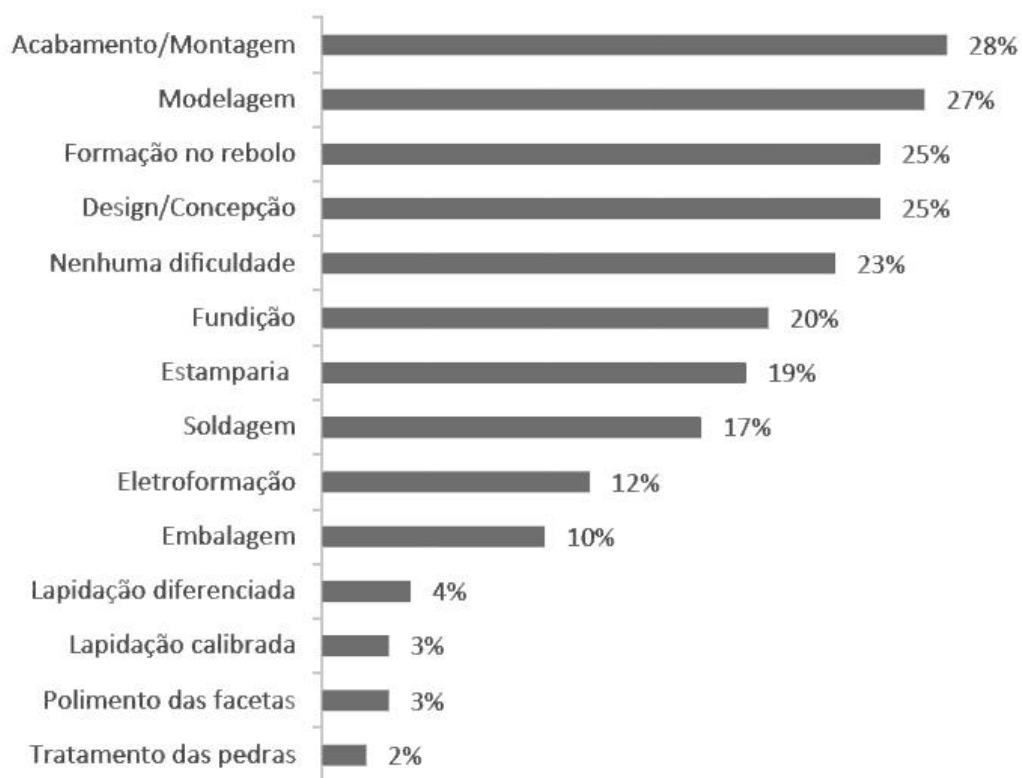
Embora tão antiga quanto possamos constatar, mesmo na era contemporânea, a joalheria tem seu desenvolvimento de modo bastante empírico. Processos de fabricação, como modelagens digitais e prototipagens estão florescendo de modo a facilitar e acelerar o processo produtivo em larga escala. Em contrapartida processos que simulem e avaliem as joias como estruturas passíveis de cargas externas, de deformação e otimização no uso de materiais ainda são bastante limitados aos métodos práticos.

A alta rotatividade de tendências, imposta pelo mercado da moda, reflete o modo acelerado com o qual ocorrem o lançamento de novas coleções no ramo joalheiro brasileiro. De acordo com CREBi (2014), pela primeira vez na história do mundo das joias, as joias de moda (joias em prata, joias folheadas e bijuterias) em um país, superam o faturamento das joias de ouro, referindo-se ao Brasil. Esse fator

determina que o grau de comprometimento para cada projeto de uma nova joia seja acelerado e por isso, grande parte das vezes, superficial.

Obviamente que os avanços tecnológicos com os sistemas de prototipagem rápida possibilitaram a aceleração do processo de desenvolvimento aliando fatores de qualidade ao produto. Porém o setor joalheiro é composto principalmente por micro e pequenas empresas, dos quais o IBGM (2012), estima que 30% estejam na informalidade, o que dificulta a aquisição das novas tecnologias, ocasionando um defasamento tecnológico. A informalidade não contribui para a especialização, logo as empresas não se responsabilizam pela busca por educação continuada de funcionários ou novos cursos e as consequências são técnicas defasadas. Aliado, há dificuldade na contratação de mão de obra qualificada para áreas como modelagem e design. Segundo IBGM/SEBRAE (2013), na indústria brasileira de joias, o setor da modelagem representa 27% das dificuldades produtivas, enquanto que o design/concepção representa 25% (Figura 1), o que em grande parte ocorre pela pouca valorização destes profissionais por parte das empresas. Tais fatores corroboram a causa do alto índice de retrabalhos dentro de uma indústria joalheira: joias disponíveis no mercado que pecam pela qualidade e mesmo o uso indiscriminado dos metais, muitos dos quais com efeitos altamente degradantes para o meio ambiente. Como resultado, tem-se um alto grau de saturação homogênea de produtos do mercado joalheiro, o qual carece por novidades, não só aquelas impostas pelo mercado da moda, mas pelo modo como ocorre o seu desenvolvimento, por produtos com melhor planejamento, tornando processos de concepção e desenvolvimento mais precisos, econômicos e sustentáveis.

Figura 1 - Problemas no processo de produção. 208 empresas do ramo joalheiro brasileiro participaram e assinalaram mais de uma opção, por isso valores superam os 100%.



Fonte: IBGM/SEBRAE (2013).

No entanto o processo de simular estruturalmente e otimizar o uso de materiais só pode ser empregado com eficácia quando houver a preparação do designer, profissional responsável pelo processo de criação de novas joias, com os conhecimentos em áreas que muitas vezes tangenciam sua formação. Como o profissional de engenharia estrutural não está inserido no ramo joalheiro, cabe ao designer compreender conceitos e análises necessárias, para uma otimização precisa e o aperfeiçoamento estrutural da joia em si.

Nesse contexto o designer tem como facilitador a sua formação com caráter multifuncional, pois dele é exigido a capacidade de relacionar-se diretamente com o cliente, a exemplo da aplicação de ferramentas fundamentais ao desenvolvimento de projetos, tais como o briefing ou análises voltadas ao consumidor. Ao mesmo tempo o designer deve ser o transformador dos desejos

imensuráveis em soluções palpáveis, onde em grande parte das vezes atua como o vendedor dos mesmos. Quando se insere no meio industrial, muitas vezes compete a ele ser o interlocutor entre anseios dos consumidores e os objetivos, metas estabelecidas pelo diretor de uma empresa. O mesmo ocorre quando trabalha dentro de uma equipe, onde cada profissional possui formação em áreas distintas, mas com características complementares.

Contudo a preparação necessária ao designer só pode ser compreendida perante a delimitação clara da pesquisa a ser abordada, da qual surge o problema de pesquisa deste estudo.

1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O tema da pesquisa é delimitado em explorar o caminho que conecta o designer a conceitos voltados a análises estruturais para o desenvolvimento de joias. Essa aproximação faz-se necessária, tendo em vista que os conhecimentos nas áreas do design e da engenharia apesar de serem complementares, possuem abordagens, direcionamento próprio da formação de cada uma, que por vezes diferem e dificultam o desenvolvimento dos projetos em si. Nesse contexto, o levantamento informacional necessário tem o intuito de preparar o designer com informações e conhecimentos necessários para que ele possa atuar, analisar e compreender os resultados obtidos nas abordagens de análise do comportamento mecânico das joias.

Busca-se com a pesquisa, a produção de conhecimento para melhorar o sistema atual de desenvolvimento de projetos no setor joalheiro. Espera-se que esses conhecimentos auxiliem na otimização no uso dos materiais, e com a simulações entenda-se como o produto se comportará mecanicamente, quando submetido a condições de uso diário. Nesse ponto, o uso do software *Abaqus CAE* possibilita a avaliação das tensões geradas sobre cada produto, bem como os deslocamentos e deformações. Esse sistema auxilia na identificação de pontos frágeis da estrutura e mesmo onde pode se ter uma redução maior no material

utilizado, reavaliando a necessidade de acrescentar ou reduzir o uso do mesmo, buscando o equilíbrio estrutural para cada produto. Destacando as cravações de gemas como os pontos mais críticos para a análise de tensões e deformações.

Com os resultados almeja-se a sistematização e consequente facilitação no processo de estruturar e quantificar adequadamente o uso dos metais necessários para a fabricação de cada joia. Por consequência, espera-se acurar a utilização de todos os demais materiais, técnicas e energia despendidas ao longo da cadeia produtiva que cada projeto consome. Porém, para que as análises propostas sejam válidas e eficazes o estudo busca a resolução do seguinte problema de pesquisa:

Como a análise estrutural pode auxiliar no projeto de joias?

1.2. OBJETIVO GERAL

Pesquisar como a análise estrutural por elementos finitos pode auxiliar o designer na avaliação de joias em processos de pré-fabricação.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Compreender conceitos de engenharia estrutural aplicáveis ao ramo das joias;
- Pesquisar como ocorre o processo atual de fabricação das joias;
- Simular para entender como algumas das principais situações de uso afetam estruturalmente as joias;
- Entender como a análise estrutural pode otimizar processos e o uso de materiais no ramo joalheiro;
- Analisar quais os principais materiais utilizados na confecção de joias e suas reservas mundiais.

- Compreender a importância da análise estrutural na busca do desenvolvimento de produtos mais otimizados, acurando o uso necessário de metal para cada projeto.

1.3. JUSTIFICATIVA

Os métodos produtivos do ramo joalheiro possuem forte caráter empírico de desenvolvimento e produção. Mesmo que os avanços tecnológicos, com o desenvolvimento dos sistemas CAD/CAM (desenho e manufatura, assistidos por computador), os quais segundo Wong e Hernandez (2012) na década de 80 viabilizaram a prototipação das primeiras peças interligando os *softwares* diretamente à produção, tenham possibilitado uma transposição gradual das habilidades artesanais do ourives para os meios digitais de concepção. Na produção de joias, tanto a grande quanto à pequena empresa, o método tentativa e erro ainda está bastante presente. Soma-se a isto o fato de que ao contrário de setores tecnológicos tradicionais, a exemplo da engenharia estrutural, na produção de joias o ramo carece de normas técnicas definidas, que direcionem e auxiliem o desenvolvimento de novos projetos.

Neste contexto, o ramo é desprovido de ferramentas de análise de pré-produção que considerem a joia como uma estrutura passível de deformações por cargas aplicadas e mesmo para uma otimização precisa acerca da quantidade de material necessária à produção de determinada peça, os quais ainda ocorrem de modo bastante intuitivo. Apesar de que a inserção dos sistemas CAD/CAM no meio joalheiro tenha em muito contribuído para agilizar e reduzir custos de desenvolvimento, focam em processos que envolvem a modelagem 3D e posterior prototipagem das peças. Então a possibilidade da análise prévia dos fatores construtivos, ainda na etapa de concepção em projeto digital, é de grande valia a fim de evitar retrabalhos bem como na otimização da utilização de materiais nobres como o ouro e a prata. O aumento do custo desses metais alimentada por instabilidades econômicas e flutuações no mercado, corrobora com a importância do

uso acurado para a obtenção de uma boa rentabilidade aos profissionais do ramo de desenvolvimento de joias. De acordo com Cotação do ouro (2016), de 2006 a início de 2016 o preço do ouro saltou de R\$ 2.400,00 a onça, a qual corresponde a aproximadas 31 gramas, para R\$ 4.800,00, uma alta de 100%. Essa alta e a manutenção do preço do ouro em patamares elevados ocasiona a crescente participação de peças mais leves no mercado, forçando um maior controle de produção no uso do material, caso a empresa queira permanecer e crescer nesse ramo.

Destaca-se ainda o uso consciente de matérias primas que demandam grandes gastos energéticos de extração e que resultam em impactos ambientais significativos. Em uma área na qual novas extrações são feitas a custos crescentes, impulsionados pela também crescente dificuldade de acesso do metal. Reforçando que redução e otimização no uso desses materiais contribuem para o melhor aproveitamento de recursos não renováveis oriundos de um planeta que carece de ações que fortaleçam a sustentabilidade e o uso consciente de materiais. Nesse entendimento a análise estrutural pode contribuir de forma significativa, acurando a utilização dos materiais, técnicas e energia despendidas ao longo do processo produtivo. Visto que a alta rotatividade de produtos é presente no ramo joalheiro, mensurar precisamente a quantidade de recursos utilizados em cada projeto é uma medida fundamental. Uma vez que o mercado consumidor anseia e alimenta uma prática pouco sustentável, a análise estrutural auxilia no uso responsável dos insumos necessários a cada projeto.

O desenvolvimento de métodos capazes de quantificar precisamente a necessidade de material empregado a cada projeto, bem como prever possíveis solicitações e deformações que a joia possa sofrer, convergem para uma ferramenta de fundamental importância, evitando processos posteriores de manutenção ou mesmo a perda da peça. Processos que correspondem a altas porcentagens de retrabalho, resultam na perda de tempo e dinheiro para ambos os lados, cliente e empresa. Segundo Lahndt (1999), análises nos diversos ramos industriais mostram que os custos diretos e indiretos associados aos problemas de qualidade excedem os investimentos em sua melhoria, dentre as razões podem ser citadas:

- Retrabalhos e correção de erros e problema em campo;

- Responder a reclamações de clientes;
- Aumento de auditorias e inspeção;
- Perda da confiança de seus clientes;
- Efeitos negativos do boca a boca dos clientes;
- Aumento dos custos de marketing;
- Perda de participação de mercado;
- Desperdício de materiais.

Nesse contexto justifica-se a utilização da análise estrutural por elementos finitos no desenvolvimento de joias, visto que:

- Pode contribuir com o desenvolvimento, até então fundamentado em demasia pelo empirismo.
- Supre a carência de análises de pré-produção na fabricação de joias.
- Beneficia a acuracidade no uso de matérias primas que possuem custos crescentes de extração e consequente processamento.
- Favorece o uso responsável dos insumos necessários no desenvolvimento de cada joia.
- Reduz gastos com processos de manutenção ou perdas ao longo do ciclo de vida do produto.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo fazer o levantamento bibliográfico de assuntos e dados que contribuam para o entendimento da pesquisa em si, explorando o universo de informações necessárias para o embasamento que o estudo requer. Os assuntos abordados contemplam a engenharia e análise estrutural, hipóteses simplificadoras quanto ao material, geometria, solicitações e condições de contorno, propriedades mecânicas envolvidas, as propriedades do latão, da prata e do ouro, dados e impactos acerca da extração dos metais utilizados, processos produtivos da indústria de joias, sistemas CAD/CAM para joalheria e as principais cravações utilizadas para o engaste das gemas.

2.1. ENGENHARIA E ANÁLISE ESTRUTURAL

“Estrutura refere-se a um sistema de partes conectadas utilizadas para suportar uma carga” (HIBBELER, 2012, p.3). De acordo com Soriano (2010), essas partes ou componentes devem ser dimensionados de modo a existir, sem serem danificados, ao seu próprio peso e às ações que lhe são aplicadas, tendo rigidez suficiente para não apresentar deformações excessivas que venham prejudicar o uso e a estética dos mesmos. O campo de estudo aplicado às estruturas, definido como engenharia estrutural, aborda diversas áreas do ramo, tais como mecânica, civil, naval, aeronáutica e bioengenharia. Com o foco voltado ao desenvolvimento estrutural do objeto, almeja o melhor uso dos materiais disponíveis, com menor

custo possível de construção e manutenção. O objetivo está em permitir que o elemento cumpra sua função primária sem entrar em colapso, deformar ou vibrar excessivamente. Os parâmetros a serem atendidos variam para cada projeto, seguindo normas técnicas específicas.

A análise estrutural é a etapa do projeto onde é feita a previsão acerca do comportamento da estrutura. Martha (2010) ratifica que o método utiliza quatro níveis de abstração sobre a estrutura analisada, definidos como estrutura real, modelo estrutural, modelo discreto e modelo computacional.

- Primeiro nível, é a abstração do mundo físico, representa a estrutura real tal como é construída.
- Segundo nível de abstração, o modelo estrutural é utilizado para representar a estrutura em caráter matemático, ou seja, abrange teorias e hipóteses baseadas em leis físicas. Soriano (2003) destaca que o modelo matemático é um aproximativo em relação ao sistema físico original, expresso por equações matemáticas. Nesse contexto, pode ser observado equilíbrio entre tensões e forças, compatibilidade entre deslocamentos e deformações e as leis construtivas dos materiais que compõe a estrutura, analisando o comportamento das estruturas perante as diversas solicitações. Para tanto se tem a idealização do comportamento da estrutura real através de hipóteses simplificadoras classificando a estrutura quanto ao material, à geometria, às solicitações que agem sobre a estrutura e às condições de suporte.
- Terceiro nível de abstração é chamado de modelo discreto (Figura 2). O processo de discretização ocorre pela passagem do modelo matemático ou geométrico para o modelo discreto, no qual o modelo contínuo é dividido em partes menores. “O domínio de definição do modelo matemático é dividido em um número discreto de subdomínios ou elementos de dimensões finitas denominados elementos finitos, interligados por meio de um número reduzido de pontos denominados nodais” (SORIANO, 2003, p.4). Esse processo gera o que é chamado de malha de elementos finitos e os

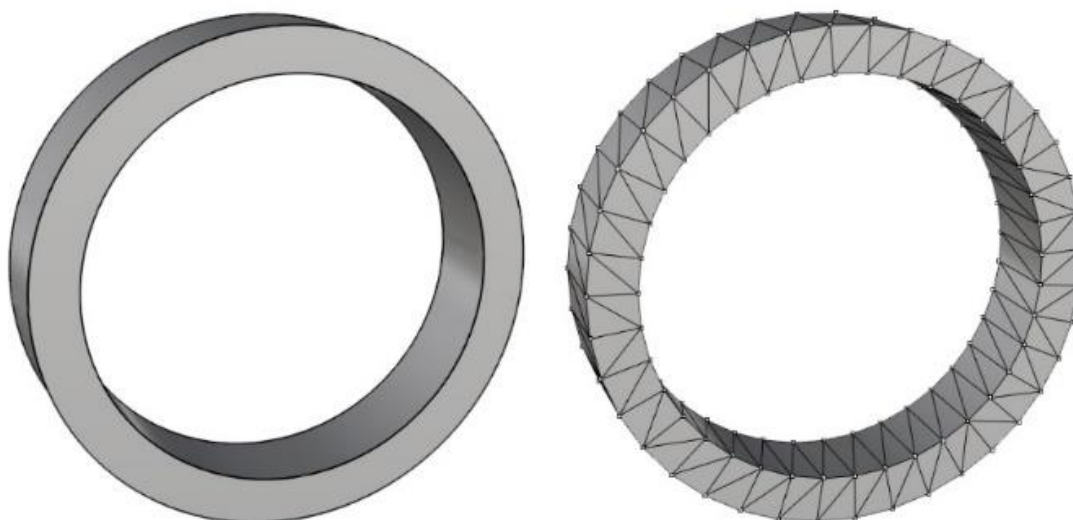
parâmetros de solução discreta constituem-se de valores de deslocamentos nos vértices da malha, chamados de nós. Soriano (2003) reforça que o método dos elementos finitos substitui o número infinito de pontos do domínio do modelo matemático com incógnitas pelo conjunto finito de pontos nodais da malha de elementos com número discreto de incógnitas.

- Quarto nível, o modelo computacional, permite a criação de modelo geométrico, geração do modelo discretizado, aplicação de atributos de análise, tais como, propriedades de materiais, carregamentos e condições de suporte, através de *softwares* como o *Abaqus*, que possibilitam a simulação e avaliação das estruturas. Leet *et al.* (2009) destacam que os programas podem trabalhar com análises de primeira ordem, presumindo que o comportamento é linear e elástico, que as forças dos membros não são afetadas pelas deformações e que nenhuma redução na rigidez à flexão é produzida nas colunas por forças de compressão. Bem como com programas de análise em segunda ordem, considerando o comportamento inelástico, mudanças na geometria e demais efeitos. Esses influenciam a magnitude das forças nas partes da estrutura, logo produzem um resultado mais fiel.

Uma vez que todas as variáveis, como o tipo de material, a geometria, as solicitações que agem sobre a estrutura e as conexões com o meio externo estejam estabelecidas, a análise estrutural torna-se um procedimento matemático de cálculo que só é alterado se as hipóteses estipuladas forem reformuladas. Hibbeler (2012) ratifica que os resultados das análises podem ser então utilizados para redesenhar a estrutura, com determinações mais precisas acerca do peso, partes que o compõe, tamanho ou espessuras utilizadas. O projeto estrutural, portanto, segue uma série de otimizações, em que cada ciclo requer uma análise estrutural realizada pelo método dos elementos finitos (Figura 2). Soriano (2003) reforça que no método dos elementos finitos substitui-se o número infinito de pontos do domínio do modelo

matemático com incógnitas pelo conjunto finito de pontos nodais da malha de elementos com número discreto de incógnitas. Sendo esses pontos

Figura 2 – Processo de discretização pelo método dos elementos finitos; À esquerda o modelo geométrico e à direita o modelo discretizado em malha composta por elementos finitos triangulares.



Martha (2010) salienta que as condições matemáticas que o modelo estrutural deve satisfazer para representar adequadamente o comportamento da estrutura real podem ser divididas em três grupos:

- Condições de equilíbrio, aquelas que garantem o equilíbrio estático de qualquer porção isolada da estrutura ou da estrutura como um todo. Ou seja, não há tendência de translação nem de rotação atuando como força resultante sobre a estrutura.
- Condições de compatibilidade entre deslocamentos e deformações, são condições geométricas que devem ser satisfeitas para garantir que a estrutura, ao deformar-se, permaneça contínua e compatível com seus vínculos externos.
- Condições sobre o comportamento dos materiais que compõem a estrutura (leis constitutivas dos materiais);

No desenvolvimento joalheiro, as condições de equilíbrio são observadas e aplicadas de modo intuitivo e empírico. No desenvolvimento, a exemplo de um anel, pingente ou brinco, deve ser observado que conforme a geometria, deposição do material, modo de uso, o corpo é submetido a forças de rotação e translação. Essas forças devem ser levadas em conta para que se tenha uma joia estável, em outras palavras, para que aquele pingente não fique pendendo de um lado para o outro, para que mantenha a posição de equilíbrio, normalmente projetada para que a face mais deslumbrante da peça fique posicionada de frente a quem a observa.

As condições de compatibilidades aplicadas às joias em grande parte toleram limites mínimos de deformações e deslocamentos. Esta não é uma norma, mas um consenso adotado através de métodos práticos, já que não é comum uma análise elaborada de caráter estrutural aplicada às joias. Designers, modelistas e ourives comumente seguem parâmetros que são estabelecidos pelos métodos de tentativa e erro, os quais foram aprimorados com os anos de experiência, o que lhes trazem o conhecimento sobre o que funciona e o que não funciona. Basta entender que a menor deformação pode fazer com que aquela esmeralda, rubi ou diamante solte da cravação em que está engastada e se perca. Porém há casos onde pode se ter uma deformação planejada, sendo piercings e brincos de pressão um bom exemplo. Em um projeto, para seu sistema de fixação, são levados em conta os parâmetros que podem trabalhar desde deformações elásticas a plásticas, porém sem ultrapassar o limite de fratura. Mas ressaltando que essa é uma característica planejada e delimitada a uma região da peça a qual queira que se deforme para atuar como mecanismo funcional.

Quanto às condições sobre o comportamento dos materiais e parâmetros que os definem, são conhecidas e amplamente utilizadas às voltadas ao processo de fundição do metal. Seja de ouro, prata ou latão, o ponto de fusão de cada material das possíveis ligas é um conhecimento que está difundido no meio industrial. O mesmo serve para o trabalho de laminação ou fiação, nos quais as propriedades térmicas são voltadas para o recozimento e recristalização do metal. Os parâmetros relacionados às propriedades elásticas, resistência e deformação são empregados de modo empírico em várias etapas do processo produtivo. Essas propriedades estão envolvidas em diversas etapas do ciclo produtivo, tais como a

laminação, a trefilação, a estamparia e processos de acabamento. No processo de laminação de um bloco de perfil retangular de metal, o operador comumente sabe o aproximado que o bloco renderá quando laminado até determinada espessura, mas com ligas de metais e medidas específicas com as quais o operador esteja habituado a trabalhar. O mesmo ocorre com o índice de elasticidade, pois pela prática é possível prever o quanto um fio de prata de x mm de diâmetro pode trabalhar dentro de um regime elástico e mesmo plástico de deformação. Mas isso em modelos simples, os quais já foram submetidos previamente a análises práticas. Em modelos novos e com certo grau de complexidade não é fácil prever o comportamento, o que requer testes e adaptações da peça matriz, que por muitas vezes precisa ser refeita.

2.1.1 Hipóteses Simplificadoras Quanto ao Material, Geometria, Solicitações e Condições de Suporte

Cada objeto projetado possui características específicas que dependem do material utilizado, da geometria de seus elementos estruturais, tipos de solicitações e mesmo das condições de apoio da estrutura. Nesse contexto faz-se necessário estabelecer hipóteses e esquemas de cálculo simplificadores, sem os quais a análise dos problemas seria impraticável, denominado por Martha (2010) como idealização do comportamento da estrutura real.

Quanto aos materiais, consideram-se contínuos, ou seja, possuem ausência de imperfeições como bolhas. São homogêneos, o que significa que possuem propriedades iguais em todos os seus pontos e isotropos, propriedades iguais em todas as direções. Salienta-se, no entanto, que os materiais, quanto às propriedades descritas, não as apresentam em um modo absoluto. Elas variam quanto aos índices de homogeneidade e isotropia e todos possuem, mesmo que em ínfima porcentagem, algum grau de heterogeneidade e anisotropia. Porém defini-lo como contínuo, homogêneo e isotrópico possibilita a aplicação das técnicas elementares do cálculo infinitesimal, necessárias às soluções matemáticas dos problemas em análise estrutural aplicadas a este trabalho.

Quanto à geometria dos elementos estruturais, são consideradas a partir de suas três dimensões: largura, altura e profundidade. Nesse entendimento De Sáles *et al.* (2015) classifica-as em três grupos: elementos lineares, elementos de superfície e elementos de volume.

- Os elementos lineares são aqueles em que duas dimensões possuem a mesma ordem de grandeza, as quais são inferiores à terceira dimensão, que comumente é da ordem de 10 vezes ou mais, usualmente denominado barra.
- Os elementos de superfície possuem duas dimensões em mesma ordem de grandeza; já a terceira dimensão é expressivamente menor, caracterizada por ser a espessura da superfície. Podem ser subdivididas em placas, quando as duas dimensões de maior grandeza estão em eixo horizontal, ou em chapas, quando uma das duas dimensões de maior grandeza estiver disposta em eixo vertical; e estruturas casca, quando possuir superfície média curva.
- Os elementos de volume, também chamadas de blocos, são aqueles que apresentam a mesma ordem de grandeza em suas três dimensões.

Quanto às solicitações que agem sobre as estruturas, podem ser de caráter externo e interno, o qual atinge o nível molecular. Timoshenko e Goodier (1980) classificam as forças externas em distribuídas sobre a superfície do corpo, tais como a pressão de um corpo sobre outro ou a pressão hidrostática e as forças externas distribuídas pelo volume, tais como forças gravitacionais, magnéticas e de inércia para um corpo em movimento. As forças de superfície e de volume podem ser decompostas em três componentes paralelas aos eixos coordenados cartesianos, x , y e z . Timoshenko e Goodier (1980), reforçam que, sob a ação de forças externas, usualmente definidas por sua intensidade, forças internas serão produzidas entre as partes do corpo, definidas como tensões. As tensões podem ser decompostas para cada área em que atuam, em uma normal, perpendicular à área e duas cisalhantes, as quais agem nos dois planos que compõem a área. De acordo com Awruch e Morsch 2009 as tensões causam mudanças na forma do corpo em

relação a sua configuração inicial e as subsequentes, o que é chamado de deformação. Deformações ocorrem como resultado do deslocamento relativo de determinados pontos que compõem o corpo. Analisando o ponto em sua configuração inicial e após a aplicação da carga, pode-se para identificar o quanto de deformação foi gerada.

Quanto às condições de apoio, Campanari (1985) define como elementos que possam impedir o deslocamento de pontos das peças. Soriano (2010) enfatiza que podem haver três deslocamentos lineares e independentes entre si, segundo os eixos cartesianos, e três rotações, independentes, em torno desses mesmos eixos. Tais deslocamentos e rotações podem no todo ou em parte serem restringidos por vínculos externos, esses classificados em:

2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS ENVOLVIDAS

Todos os materiais, enquanto utilizados, são expostos a estímulos externos, os quais provocam algum tipo de resposta. Nesse contexto, a propriedade de um material é definida por Callister e Rethwisch (2012, p.3), como uma característica em termos de tipo e magnitude de resposta a um estímulo específico imposto, a qual geralmente independe da forma e tamanho do material. Já a classificação referente às propriedades, pode ser dada de diversos modos. Ferrante e Walter (2010) simplificam-na agrupando em propriedades físicas e propriedades mecânicas. Essa classificação tem como ponto positivo a indicação da possibilidade de serem ou não modificadas as propriedades do material. Enquanto que as propriedades físicas não podem ser alteradas, as mecânicas são passíveis de modificações.

Callister, e Rethwisch (2012, p.3) agrupam as propriedades importantes para materiais sólidos em seis categorias diferentes: mecânica, elétrica, térmica, magnética, ótica e deteriorativa. As propriedades mecânicas, em grande parte, são determinadas por ensaios de tração e compressão, onde podem ser obtidos índices de tensão de escoamento e tensão de ruptura. Esses índices são fundamentais para

o estudo, já que estão diretamente relacionados ao comportamento de deformação da estrutura da joia quando submetida a cargas. A tensão de escoamento e posterior tensão de ruptura, dadas pela unidade Pascal, são dados fundamentais ao estudo, pois marcam os índices nos quais se tem o início da fase de deformação plástica, que é irreversível, e o ponto de falha do material, respectivamente, característico dos materiais dúcteis. Quando há uma ruptura súbita, sem deformação plástica prévia, diz-se que o material é pouco dúctil ou frágil.

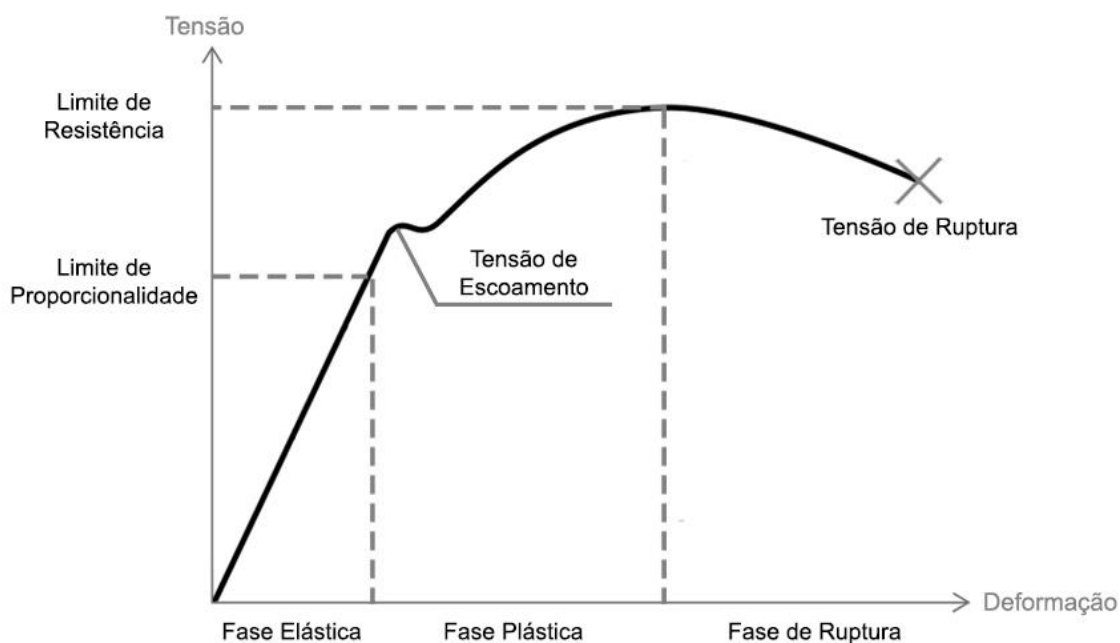
Outra propriedade fundamental para entender o comportamento do material em análise de cargas é o módulo de elasticidade. Com o módulo de elasticidade é possível calcular o comportamento elástico que um dado material terá quando submetido a cargas. O módulo de elasticidade é uma propriedade física do material, logo intrínseca ao mesmo, a qual depende da composição química, microestrutura e defeitos, tais como poros e trincas. De acordo com Timoshenko e Gere (1983) é uma constante de proporcionalidade, obtida pela razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material, no qual a tensão é definida pela força aplicada por unidade de área e a deformação é a variação nas dimensões iniciais. A unidade internacional utilizada para o módulo de elasticidade é a Pascal (Newton/m²). Grande parte dos materiais utilizados apresentam altos índices de elasticidade, e por isso faz-se uso do megapascal (MPa = 10⁶ Pa) e do gigapascal (GPa = 10⁹ Pa). Ferrante e Walter (2010) destacam que o módulo de elasticidade é uma propriedade relativamente constante para cada uma das famílias dos materiais, por exemplo, aproximadamente igual para todas as ligas de alumínio, e que grandes variações dentro da mesma família são encontradas apenas em polímeros, compósitos e algumas ligas metálicas com alto teor de liga. É diretamente proporcional à temperatura de fusão do material, ou seja, quanto mais alta a temperatura de fusão, mais alto será seu módulo de elasticidade. Timoshenko e Gere (1983) reforçam que para a maioria dos metais o módulo de elasticidade sob compressão e sob tração é igual.

Para baixos níveis de carregamentos e deformações, ou seja, no regime elástico, o material possui deformação que é reversível após a retirada das cargas que a originou. Fontes (2005) reforça que dentro do regime elástico há uma constância entre as deformações transversais e longitudinais, e o valor dessa

corresponde ao coeficiente de Poisson. A determinação desse coeficiente é fundamental para a pesquisa e posterior simulação de análises, pois através dele pode-se compreender com qual proporção o material de estudo tem deformação dentro do regime elástico. Através das mensurações de diversas ligas metálicas feitas por Gere (2004, pag. 913), percebe-se que o coeficiente de Poisson é constante, com variações muito pequenas dentro da família dos metais.

Na Figura 3 observamos uma curva de tensão por deformação de um dado material dúctil, nela podem ser identificados os conceitos citados anteriormente.

Figura 3 – Curva de tensão por deformação de um dado material dúctil, destacando pontos importantes na transição da fase elástica, para a plástica e posterior ruptura.



Os valores da tensão de escoamento e limite de resistência podem ter grandes variações dentro de um mesmo material em consequência de tratamentos térmicos ou termomecânicos. Um exemplo é o aumento do limite de resistência do material pelo processo de têmpera, no qual há o aquecimento do metal a uma temperatura próxima a de fusão e posterior resfriamento brusco em água. Com esse processo há o aumento da dureza, ou seja, a resistência à abrasão, riscos e

amassaduras, e em contrapartida tem-se a diminuição da ductilidade e da tenacidade que é a resistência à propagação de trincas diante de cargas de impacto.

2.3. PROPRIEDADES DO OURO, DA PRATA E DO LATÃO

Pavanati (2010) define materiais como substâncias que possuem propriedades que os tornam úteis na construção de máquinas, estruturas, dispositivos e produtos. Classifica os materiais sólidos, baseado em sua estrutura atômica e ligações químicas predominantes, dentro de quatro grupos principais: os metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. No ramo joalheiro, ouro, prata e latão, pertencentes ao grupo metálico, tem destaque como materiais mais utilizados. Segundo dados do IBGM/SEBRAE (2013), nas indústrias brasileiras de joias, peças em ouro corresponderam a 44% do mix de produtos (Figura 4). Esse índice é seguido pela prata com 36% e bijuterias (peças compostas, por ligas de zinco, ligas de estanho, às quais podem utilizar componentes plásticos, miçangas e demais materiais de baixo valor em sua composição) 32%. Folheados acabados (peças, comumente em latão, composto por cobre e zinco, as quais já passaram por todo processo de acabamento, incluindo a galvanoplastia, o qual faz o recobrimento por eletrólise da peça com uma camada de metal nobre, a exemplo do ouro e da prata) correspondem a 27% e folheados brutos (peças compostas principalmente por ligas de cobre, a exemplo do latão, ligas de zinco e ligas de estanho, as quais ainda não passaram pelo processo de galvanoplastia) 21%.

Figura 4 – Mix de produtos de ramo joalheiro no Brasil, 208 empresas participaram e assinalaram mais de uma opção, por isso os valores superam os 100%.



Fonte: IBGM/SEBRAE (2013).

O ouro é um metal nobre de cor amarela, representado quimicamente e no meio joalheiro pela sigla Au. A origem da sigla vem do latim, onde ouro é chamado de *aurum*. Possui temperatura de fusão de 1070°C, é dúctil e maleável. Resistente ao oxigênio, à água, às bases, e à maioria dos ácidos, e por isso é um metal muito valioso para a joalheria. O ouro puro, denominado ouro 1000 ou 24k (quilates) é mole e por isso apresenta pouca resistência quando dobrado, podendo deformar-se facilmente colocando em risco a forma e a beleza da joia. Por isso, nas joias, é muito utilizado o ouro 750, na qual se tem a liga com 75% de ouro puro e 25% de outros metais, usualmente 12,5% de prata e 12,5% de cobre, também chamada de 18k, 18 partes de ouro e 6 partes de outros metais. No caso do ouro branco, comumente é substituído os 12,5% de cobre por paládio e frequentemente é

dado um banho de ródio no final do processo, o que confere um brilho maior e mais claro à joia. Segundo Kopeliovich (2015) a liga de ouro branco composta por 70% de ouro e 30% de platina possui densidade de $1.992 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^3$, módulo de elasticidade de 114 GPa, limite de escoamento de 244 MPa, com metal recozido. De acordo com Bresciani *et al.* (2011) o processo de recozimento recupera a estrutura cristalina do metal, evitando o rompimento das mesmas devido às deformações plásticas, eleva a ductilidade mas diminui a resistência mecânica. O coeficiente de Poisson do ouro 24k foi determinado por Köste e Franz (1961) com o valor de 0,42, o mesmo pode ser adotado para a liga anteriormente descrita, recordando que por Gere (2004, p.913), o coeficiente de Poisson é constante com variações muito pequenas dentro das ligas metálicas.

A prata é um metal nobre branco representado quimicamente e no meio joalheiro pela sigla Ag, oriundo do latim, onde prata é chamado de *argentum*. Pura, é conhecida como prata 1000, mas nas joias frequentemente é utilizada em ligas com 7,5% de cobre e 92,5% de prata, chamada de prata 925. De acordo com Smith e Fickett (1995) o coeficiente de Poisson da prata pura é de 0,364, sendo o mesmo adotado para a prata 925. O módulo de elasticidade das ligas de prata que variam entre 97% a 90% de prata e 3% a 10% cobre foi mensurado por Dürrwächter e Merl (2011) em 85 GPa. O limite de escoamento da prata 925 definido por Kopeliovich (2015), é de 124 MPa com metal recozido e a densidade equivalente a $1.037 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^3$. A prata possui temperatura de fusão de 961°C , é dúctil e maleável. É suscetível à oxidação, e de acordo com Sartori *et al.* (2008), em muitos casos, essa oxidação ocorre pelo contato com oxigênio e compostos contendo enxofre. A poluição atmosférica contém grande quantidade desses compostos, chamados sulfurados que podem ocasionar o escurecimento da prata.

O latão é uma liga metálica de cor amarela (pálida), constituída, geralmente, por mais de 50% de cobre e 5% a 45% de zinco. A liga composta por 75% cobre e 25% zinco é frequentemente utilizada no setor joalheiro em processos de fundição devido à sua coloração e maleabilidade similar ao ouro. Ligas com percentuais acima de 36% de zinco, de acordo com Pohlmann (2012), são utilizadas na forma de chapa em processos de estampagem. As ligas de latão possuem pontos de fusão relativamente baixos e que variam conforme a proporção dos metais

constituintes, entre 900° C a 940° C. Alzamora (2005) ressalta as qualidades para o uso na joalheria, tais como o baixo custo, elevada resistência à tração, pode ser submetido a processos galvanoplásticos, de fácil acabamento industrial e obtém brilho com facilidade. Para o estudo adota-se a liga de latão composta por 80% de cobre e 20% de zinco. Esta liga, de acordo com Kopeliovich (2015), possui módulo de elasticidade de 110 GPa, limite de escoamento de 138 MPa e densidade de $8.66 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$. O coeficiente de Poisson, mensurado por Gere (2004) é de 0,340.

Dentre as propriedades descritas, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e o limite de escoamento (Quadro 1), são fundamentais no processo de simulação para análise de cargas. Os dados serão utilizados para alimentar o *software* de análises por elementos finitos *Abaqus*. Reforçando que para a análise os materiais foram considerados elastoplásticos perfeitos.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas do ouro branco, prata e latão utilizados nesta pesquisa, necessárias para a análise de cargas.

Metal	Módulo de Elasticidade	Coeficiente de Poisson	Limite de Escoamento	Densidade
Ouro Branco 70% Au, 30% Pt	114 GPa	0,42	244 MPa	$1.992 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^3$
Prata 925	85 GPa	0,364	124 MPa	$1.037 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^3$
Latão 80% Cu, 20% Zn	110 GPa	0,340	138 MPa	$8.66 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

2.4. DADOS E IMPACTOS NA EXTRAÇÃO DOS METAIS UTILIZADOS

Os dados de extração dos metais citados no capítulo anterior podem ser observados no Quadro 2, com a mensuração das reservas mundiais, produção mundial, maior produtor de cada metal, o uso e os índices de reciclagem (esses dois últimos dados referentes aos Estados Unidos). Esse levantamento informacional pertence ao relatório anual 2015, desenvolvido pela U.S. Geological Survey, com

base nos dados colhidos ao longo do ano de 2014, e permitem a compreensão acerca dos índices de produção frente às reservas mundiais. Percebe-se o quão elevado é a demanda anual por esses metais, para os mais variados setores da economia, dentre os quais se situa o joalheiro, principalmente na demanda por ouro e prata. Esse fator ressalta a importância do uso consciente dessas matérias primas não renováveis, que apesar de possuir índice expressivo de reciclagem no ouro, não é acompanhado pelos demais metais.

Quadro 2 – Dados de reservas mundiais, produção mundial, maior produtor mundial, porcentagem de uso e reciclagem nos EUA dos metais: ouro, prata, cobre e zinco, amplamente utilizados no ramo joalheiro.

Metal	Reservas Mundiais	Produção Mundial	Maior produtor	Uso nos EUA	Reciclagem nos EUA
Ouro	55.000 ton.	2.860 ton.	China 450 ton.	41% joias 35% elétrica e eletrônica 18% moedas oficiais 4% dental 2% outros	200 ton. Superou o consumo reportado em 165 ton.
Prata	530.000 ton.	26.100 ton.	México 4.700 ton.	42% elétrica e eletrônica 35% moedas e medalhas 13% fotografia 7% joias 3% outros	1.400 ton. Cerca de 20% do consumo.
Cobre	700.000.000 ton.	18.000.000 ton.	Chile 5.800.000 ton.	43% construção 19% elétrica e eletrônica 19% equip. de transporte 12% produtos em geral 7% equip. industriais	180.000 ton. de sucata velha, aproximadamente 10% do consumo e 640.000 ton. de sucata nova
Zinco	230.000.000 ton.	13.300.000 ton.	China 5.000.000 ton.	80% galvanização 6% latão e bronze 5% ligas a base de zinco 9% outros	95.000 ton. cerca de 52% do produzido no ano

Fonte: Adaptado de USGS - U.S. Geological Survey (2015).

O uso consciente dos metais é extremamente necessário, já que o nível de impacto ambiental gerado pelas atividades de extração é extremamente grande.

O elenco de efeitos nocivos originários da mineração sobre o ar, a água e o solo está bem documentado há bastante tempo, incluindo: drenagem de águas servidas, assoreamento, drenagem ácida e metais pesados em cursos d'água; gases ácidos ou contaminados com chumbo e outros gases nocivos ou de odores desagradáveis no ar; explosão e desmonte de rocha; nuvens de poeira oriundas dos caminhões, frente de lavra e bacias de rejeito; desmoronamento de bancadas das frentes de lavra em tiras a céu aberto e cicatrizes em outras formas de estocagem do capeamento ou estéril; subsidência; e, talvez o mais deprimente de tudo, a decadência das cidades mineiras. (SOUZA, 1999).

Percebe-se que os impactos resultantes da extração estão presentes em diversas esferas, o que torna complexo a mensuração dos efeitos negativos gerados pela atividade. O recente caso do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – Minas Gerais é um exemplo no que a falta de cuidado com os dejetos de mineração pode acarretar. De acordo com Brito (2015) no incidente foram lançados cerca de 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos na bacia hidrográfica local. Os quais apontam para um quadro desolador de impactos à flora, à fauna, à qualidade da água de abastecimento, além das repercussões socioambientais das comunidades que dependem das atividades locais.

Outro exemplo é a atividade de extração do ouro, a qual, de acordo com Caheté (1998), geralmente ocorre por garimpagem ou pela mineração industrial. Na garimpagem a coleta está baseada na utilização do mercúrio, metal extremamente tóxico de efeito acumulativo no organismo humano, onde a parte que não forma amálgama com as partículas do ouro presentes para a sua captura, é perdida no ambiente. O mesmo ocorre posteriormente com a parcela amalgamada durante o processo de queima desta liga para purificar o ouro. Esse processo ocorre tanto nos garimpos legais quanto informais e ilegais, e a diferença é que no primeiro há uma série de normas que devem ser cumpridas, medições e compensações dos impactos ambientais. Segundo Wanderley (2015) pelo menos 90% dos garimpos na Amazônia

atuam na informalidade e na ilegalidade. Esse último além de não cumprir parcialmente as regulamentações, desenvolve atividades em áreas proibidas.

De acordo com Barbosa e Souza (2000), cerca de 3 mil toneladas de mercúrio utilizados ao longo dos últimos 20 anos estão contaminando as águas e sedimentos nos rios da Amazônia. Os resultados nas populações ribeirinhas é um índice alarmante de 1,4 mg/kg do mercúrio presente por indivíduo, quando a máxima permitida pela Organização Mundial da Saúde é de 0,5 mg/kg. Esse índice já contribui para um desenvolvimento anormal das crianças, beirando o 1,5 mg/kg no qual já aparecem sintomas sub-clínicos.

No setor formal, tem-se o uso predominante do cianeto de sódio (NaCN) para a exploração do ouro. De acordo com Caheté (1998), para cada tonelada de minério é consumido 250 gramas de cianeto além de outras substâncias, tais como soda cáustica, ácido clorídrico, cal virgem, necessárias para a dissolução do ouro. É um processo que envolve uma série de reações químicas complexas e exige um rigoroso controle, pois ao contrário do mercúrio, o cianeto não atua como processo acumulativo crônico nos tecidos do organismo, podendo matar de forma mais imediata se não for manuseado dentro dos rigores técnicos. O principal meio atingido pelos contaminantes são os corpos d'água, que já ameaçados pela infiltração de combustíveis fósseis, água de esgotos, agrotóxicos, fertilizantes e outros compostos químicos tem o cianeto como um novo risco em expansão.

Destaca-se que não foram levados em consideração os índices de gastos energéticos, consumo hídrico para o processamento do material, entre tantos outros fatores que a exploração em si acarreta. Mas com essa análise específica, sobre a exploração do ouro, percebe-se o quão impactante é a extração, mesmo que voltada a uma esfera de atuação, no caso os dejetos.

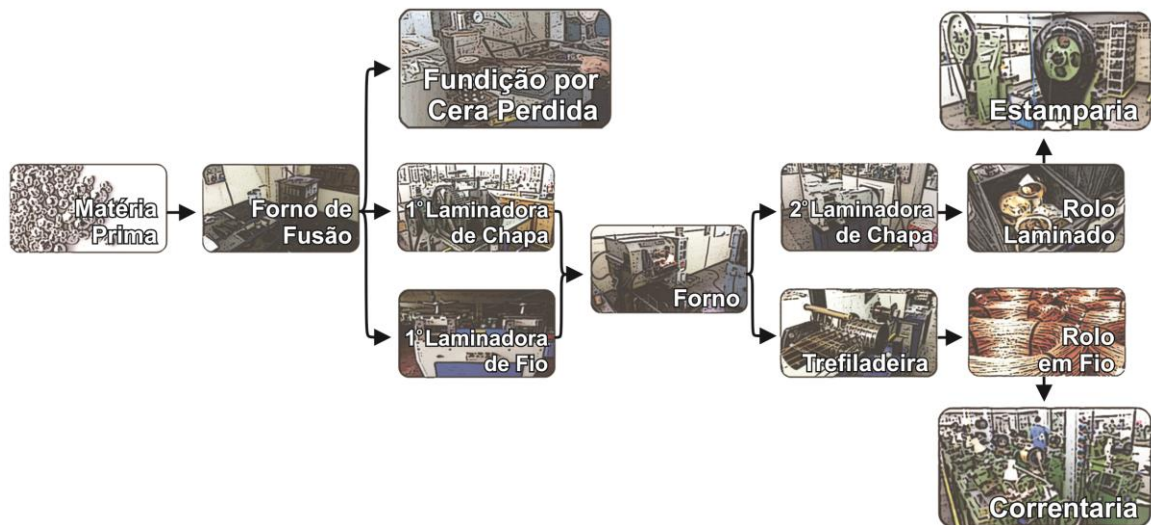
Os dados levantados nesse tópico reforçam os meios pelos quais esta pesquisa se justifica. Pois esses reforçam o quão importante são os avanços de estudos que possam fundamentar a redução e o uso responsável dos metais envolvidos na fabricação de joias.

2.5. PROCESSOS PRODUTIVOS DA INDÚSTRIA JOALHEIRA

A história das joias tem sua origem no processo artesanal, dos objetos de adornos confeccionados a partir de ossos e pedras na pré-história, aos profissionais da ourivesaria, sendo que a habilidade manual na confecção das peças sempre foi fundamental. O caráter artesanal persiste, e Guilgen e Ferro (2015) reforçam que é o mais utilizado na fabricação de joias exclusivas, as quais ocupam em grande parte um nicho de mercado de alto valor, a exemplo das desenvolvidas por marcas de renome e suas linhas de alta joalheria como Boucheron, Cartier e Van Cleef & Arpels.

Já o ramo industrial, das joias produzidas em grande escala, desenvolve-se de modo a não depender tanto da capacidade técnica de um ourives, segmentando o conhecimento em processos que possam ser desenvolvidos cada vez mais por máquinas. Souza et al. (2012) ressalta que o desenvolvimento de novos instrumentos de produção é necessidade constante do sistema capitalista, na busca da maximização da produção e minimização do tempo gasto para produção. As máquinas possibilitaram a produção em larga escala, a transição do artesanal e manufaturado para o maquinofatura, atuando ao longo de grande parte da cadeia produtiva. Os níveis de mecanização variam muito dentro das empresas e que alguns setores possuem trabalho com caráter mais artesanal e manufaturado do que maquinofaturado. Para entender o sistema de produção, tem-se como exemplo uma indústria de pequeno a médio porte, onde comumente podem ser encontrados produtos oriundos de três macroprocessos: correntaria, estamparia e fundição por cera perdida. A Figura 5 exemplifica os principais processos envolvidos e maquinários utilizados até essas três etapas, onde a partir dessas, cada produto seguirá padrões específicos de soldagem, acabamento, montagem e banho, conforme cada projeto necessitar.

Figura 5 – Processos de fabricação envolvidos na indústria joalheira da matéria prima ao setor de correntaria, estamparia e fundição por cera perdida.



No forno de fusão a matéria-prima é transformada, de metal em estado sólido para estado líquido, através de alta temperatura, a qual varia conforme a liga de metal utilizada. O metal fundido pode ser vertido em moldes de sulfato de cálcio para o processo de fundição por cera perdida ou vertido em moldes de ferro fundido chamados de lingoteiras, que dão forma a blocos de perfil retangular ou barras.

Os blocos de metal de perfil retangular são laminados sucessivas vezes, por uma laminadora de chapa, denominada assim por possuir dois cilindros com corpos totalmente paralelos entre si. O metal é forçado a passar por esses cilindros, regulados para que a cada passada fiquem mais próximos entre si e com a diminuição da espessura do metal tem-se o aumento do comprimento e da largura da chapa. Durante as laminações, são intercalados processos de recozimento do metal no forno. É comum que haja duas máquinas laminadoras, a primeira para as placas de maior espessura e a segunda para os processos de laminação final, produzindo os rolos laminados de espessuras variadas que podem chegar a 0,3 mm, dimensão essa bastante utilizada nas joias estampadas. Findo o processo de laminação os rolos de metal laminado são encaminhados às máquinas de estamparia, onde são estampados por prensas hidráulicas de acordo com a matriz,

feita em aço temperado, de cada projeto, processo denominado por Fonseca (2006) como formativo (Figura 6).

Figura 6 – Matriz em aço temperado, serve como molde para o metal laminado que é encaminhado ao processo de estamparia. À direita, em detalhe, a matriz da medalha de Nossa Senhora Aparecida, utilizada na confecção de escapulários em metal.



As barras são encaminhadas para laminadora de fios, a qual possui cilindros com entradas semicirculares, dando a pré-forma aos fios. Laminados por várias vezes, intercala-se o processo de recozimento no forno, a exemplo da laminação de chapas. Após serem pré-formados, os fios são encaminhados à trefiladeira, máquina que permite a adaptação de fieiras, possibilitando a redução do diâmetro do fio a medidas muito pequenas como 0.26 mm. Essas fieiras são moldes em aço, com aberturas cônicas que diminuem gradativamente seu diâmetro, pelas quais o metal é forçado a passar (Figura 7). Ao final do processo os rolos de metal em fio são encaminhados para a correntaria, onde máquinas transformam o fio em corrente, secionando, moldando e fechando, elo por elo.

Figura 7 – Processo de trefilagem, cinco feiras adaptadas na máquina para a redução gradual da espessura do fio de metal.

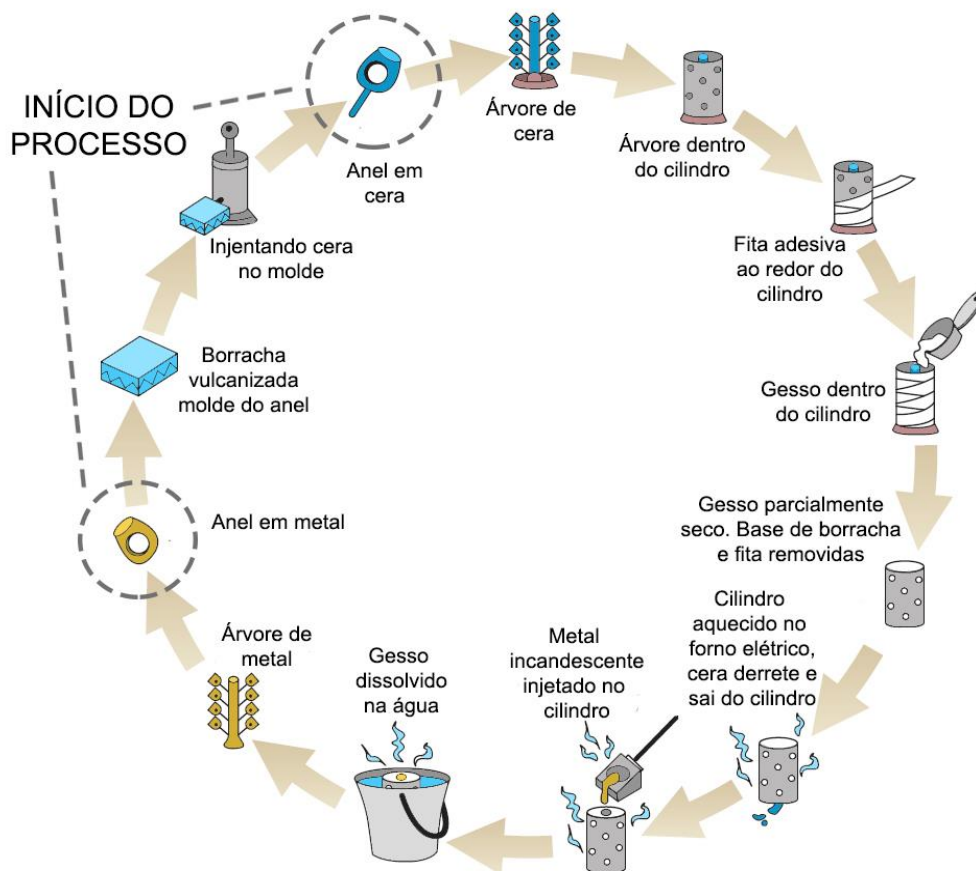


Com a compreensão dos principais pontos acerca do processo produtivo, o levantamento informacional tem foco no detalhamento do processo de fundição por cera perdida, etapa onde a simulação prévia de modelos 3D sob a ação de cargas estará inicialmente direcionada. Obviamente que com a evolução da pesquisa podem ser englobados produtos fabricados por processos de estamparia, e correntaria, analisando como espessuras e formas podem ser otimizadas. Porém a abordagem será a fundição por cera perdida, etapa na qual as novas tecnologias de modelagem 3D e prototipagem rápida estão agregando diferenciais significativos nos últimos anos. Como a fundição por cera perdida é um processo produtivo em expansão, segundo Guilgen e Ferro (2015), a produção seriada de modelos em cera tem sido cada vez mais utilizada na prática da joalheria contemporânea.

2.5.1 Fundição por Cera Perdida

A fundição por cera perdida, também chamada de microfusão, é um processo muito utilizado no meio joalheiro, pois possibilita um grande nível de detalhamento dos modelos desenvolvidos além da fabricação de um grande número de peças com apenas uma injeção de metal no molde (Figura 8). De acordo com Giuliano (2008) a técnica consiste na aplicação de um revestimento cerâmico sobre uma matriz de cera, formando um molde; em seguida a cera é eliminada do interior deixando o vazio no molde cerâmico, no qual é vertido o metal em estado líquido. “O processo é simples em essência, mas está longe de ser uma ciência exata, pois é feito com muitos detalhes que requerem atenção, prática e experimentação”. (SANTOS, 2013, p.166)

Figura 8 – Ciclo do processo de fundição por cera perdida.



Fonte: Adaptado de Pompei (2005).

O processo é cíclico, e começa com o desenvolvimento da matriz, a qual pode ser confeccionada diretamente no metal ou inicialmente em cera. Caso comece com a matriz em metal, o processo fará um ciclo e terminará com as cópias em metal. Se começar com a matriz em cera, seguirá o processo até que a mesma seja fundida em metal e após completará um ciclo terminando com as cópias em metal.

Para a descrição a seguir, considera-se o início do processo na matriz em metal, confeccionada normalmente em latão, a partir da qual são geradas as cópias. A matriz é fixada um fio de metal, com diâmetros variados, formando o duto de alimentação da peça, chamado na indústria de “jito”. De acordo com Ferrante e Walter (2010) a espessura da parede dos metais injetados no processo de fundição por cera perdida admite a margem de 1 a 75 mm, na prática, sabe-se que podem ser trabalhados com o limite mínimo de espessuras em 0.7 a 0.6 mm, necessários principalmente em áreas onde há maior fluxo de material, tanto para cera como posteriormente para o metal. Dependendo da complexidade da peça podem ser adicionados mais de um “jito” para alimentar a entrada e saída da cera e posterior entrada do metal. A matriz é então envolta por uma borracha, normalmente a base de silicone, que possui grande capacidade de reprodução de detalhes, resistência ao calor e ao rasgamento. O material é então encaminhado a vulcanizadora, equipamento no qual é colocado sob pressão entre duas chapas quentes, processo pelo qual é feita a cura do material, passando-o de cru a vulcanizado. Santos (2013) salienta que borrachas de vulcanização a quente, amplamente utilizadas, podem sofrer reduções que variam de 2% a 10%, pois ao ser aquecido o mesmo expande-se e quando resfriado contrai-se. O próximo processo é o corte da borracha, realizado nas laterais de maneira que após a retirada da matriz as duas partes do molde encaixem-se novamente. O corte é feito manualmente, com auxílio de um bisturi, recomendando-se que seja feito em ziguezague, com exceção no entorno da peça. Esse tipo de corte forma dentes na borracha o que auxilia na precisão do encaixe posterior e reduz problemas com rebarbas na injeção da cera. Com a borracha finalizada tem-se o processo de injeção, a injetora aquece a cera, liquefazendo-a e inserindo-a no orifício, antes ocupado pela matriz. Muitas injetoras trabalham com sistema a vácuo sugando o ar do interior da borracha e após

injetando a cera, reduzindo problemas com peças parcialmente preenchidas. As ceras para fundição disponíveis no mercado variam quanto à temperatura de injeção, penetrabilidade, flexibilidade, mas de acordo com Pohlmann (2012), são típicos materiais termoplásticos, alternando do estado sólido rígido para o líquido quando submetidas ao calor. Retirado da borracha, o modelo em cera sólida é submetido ao processo manual de retirada de rebarbas que possam ter ficado entre os encaixes das borrachas e para isso é comum à utilização de um bisturi. Findo o processo de rebarba, modelo por modelo é fixado manualmente em um cilindro central de cera. Normalmente com o auxílio de um ferro de solda ou pirógrafo, a cera é aquecida nos “jitos”, agora em cera, para que após o resfriamento fixe-se ao duto central formando a rede de canais que alimentará as peças, resultando na estrutura conhecida como árvore de cera. As peças devem ficar inclinadas em relação ao tubo central de alimentação, sendo reforçado por Santos (2013) o ângulo de 45°, para que se tenha um bom processo de deceragem e posterior injeção do metal. A árvore é fixada a uma base de borracha e após é pesada, para que se calcule a necessidade de metal a ser vertido e posteriormente é encaixada em um cilindro metálico com furos laterais. Com a vedação desses furos por fita adesiva, é vertido sulfato de cálcio, previamente preparado, no interior do cilindro. Lana (2010) reforça que após esse processo os cilindros são colocados em uma centrífuga e/ou vácuo para remover possíveis bolhas de ar que possam ficar aprisionadas no molde, acarretando em falhas. Com a secagem parcial do sulfato de cálcio, aproximadamente duas horas, o adesivo e a base de borracha são retirados. Após o cilindro é levado ao forno para a secagem e endurecimento final do molde. Santos (2013) destaca que o aquecimento deve ser feito de forma gradual, começando com temperatura baixa em 150°C, atingindo 730°C, no qual permanece por duas horas e por fim reduzindo a 660°C, onde permanecendo por uma hora. Com esse processo há a calcinação do revestimento, adquirindo as propriedades físicas necessárias para receber o metal fundido. Com a alta temperatura do forno, a cera é liquefeita e escorre para fora do molde, esvaziando as cavidades. Com o molde ainda aquecido, o mesmo é virado para que o metal fundido seja vertido, escoando através dos canais e preenchendo as cavidades. Nessa etapa do processo é comum fazer uso de vácuo ou do processo de centrifugação para um melhor fluxo do metal e

consequente preenchimento completo das formas e detalhes. Após a solidificação do metal, tempo recomendado em aproximados 10 minutos, o sulfato de cálcio é dissolvido em contato com a água. Em alguns casos, nos quais se tenham gemas frágeis já cravadas no modelo em cera, para evitar que trinquem por choque térmico, pode se optar por abrir o molde de modo manual e mecânico. Por fim tem-se a árvore em metal, da qual os modelos são cortados com auxílio de alicates, seguindo o processo de acabamento superficial para a finalização do produto.

2.6. SISTEMAS CAD/CAM PARA A JOALHERIA

A evolução dos maquinários e novas tecnologias continuam a beneficiar o processo de desenvolvimento joalheiro nos diversos setores de produção, dentre os quais está o setor de diretamente ligado à criação, no qual é feita a modelagem das novas peças a serem produzidas. Antigamente produzidas em sua totalidade por meios artesanais, são agora desenvolvidas, em grande parte, por métodos computacionais que permitem a interação direta entre desenho e modelo 3D virtual com o sistema de manufatura de produção para o desenvolvimento da peça real, também conhecidos como sistemas CAD/CAM, desenho assistido por computador e manufatura assistida por computador. Thornton (1998) destaca que os sistemas CAD/CAM tornaram possível o desenho computadorizado em três dimensões, possibilitando a conversão do mesmo em cera, a qual pode ser fundida e produzidas em massa, gerando uma grande economia de tempo para as indústrias. Rocha *et al.* (2011) enfatizam que a modelagem no sistema CAD permite a simulação de um modelo tridimensional e exame de formas e tamanhos como se já tivesse sido produzida fisicamente, possibilitando a avaliação prévia o que evita interpretações equivocadas e minimiza erros de produção.

Dentre os programas CAD, o *Rhinoceros 3D* é um dos mais utilizados para a modelagem virtual de joias, contando com *plug-ins* específicos para a área, a exemplo do *Rhino Gold*. Rosetti (2011) ressalta que o *software* possui recursos que possibilitam a modelagem em três dimensões das mais complexas formas orgânicas

e geométricas com extrema precisão, além de possibilitar a renderização, processo que gera imagens realistas através dos modelos virtuais simulando luz, materiais e texturas. Destaca também a grande capacidade de importar e exportar arquivos, atuando como uma espécie de conversor para outros *softwares*, sendo compatível com todas as máquinas de impressão 3D do mercado. Com a precisão de medidas, fornecidas pelo *software Rhinoceros 3D*, pode-se avaliar mecanismos de encaixe, fixação dos modelos difíceis de serem feitas pelo processo convencional de modelagem. Tais pontos justificam a escolha desse *software*, destacando o uso difundido do mesmo no meio joalheiro. Logo se utiliza a mesma ferramenta de modelagem utilizada pela grande maioria das empresas joalheiras. Assim, os benefícios que esta pesquisa possa proporcionar, no que diz respeito à modelagem, vão ao encontro dos métodos utilizados no meio industrial, não necessitando mudanças ou treinamentos para novos *softwares*.

De acordo com Pohlmann (2012), os benefícios obtidos com a utilização do sistema CAD são melhor aproveitados quando utilizados juntamente com o sistema CAM, o qual faz uso de equipamentos de prototipagem para a produção automatizada dos modelos. Fonseca (2006), divide a produção automatizada dos modelos em quatro processos fundamentais:

- Subtrativos, caracterizados pela retirada de material de um bloco inicial de matéria-prima em processos de usinagem, a exemplo dos equipamentos automatizados denominados de *Computer Numerical Control (CNC)*.
- Aditivos, caracterizados pela adição sucessiva de camadas de material até formar o objeto projetado, a exemplo de impressoras 3D e máquinas de estereolitografia.
- Formativos, caracterizados pelo emprego de forças mecânicas para a conformação dos modelos através de ferramentas pré-definidoras, a exemplo das máquinas de estamparia.
- Híbridos, caracterizados pela combinação entre dois ou mais processos de natureza subtrativa, aditiva e/ou formativa.

Rocha *et al.* (2011), reforçam o grande avanço no desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente pelos processos aditivos, onde novos equipamentos e técnicas surgem, necessitando a especialização dos profissionais em conhecimentos que são constantemente renovados. Nesse intuito, bibliografias como Rosetti (2011), *Desenhando Joias com Rhinoceros*, proporcionam informações técnicas à modelagem virtual de joias, abordando o processo, indicando tamanhos, espessuras para posterior processamento em sistema CAM, o que contribui em muito para esse nicho tecnológico em crescimento. Com o avanço tecnológico e inovações recentes, o nicho anseia por mais bibliografias e pesquisas de auxílio, já que ao contrário de outros setores tecnológicos, não existem normas técnicas estabelecidas que direcionem e auxiliem o desenvolvimento de novos projetos.

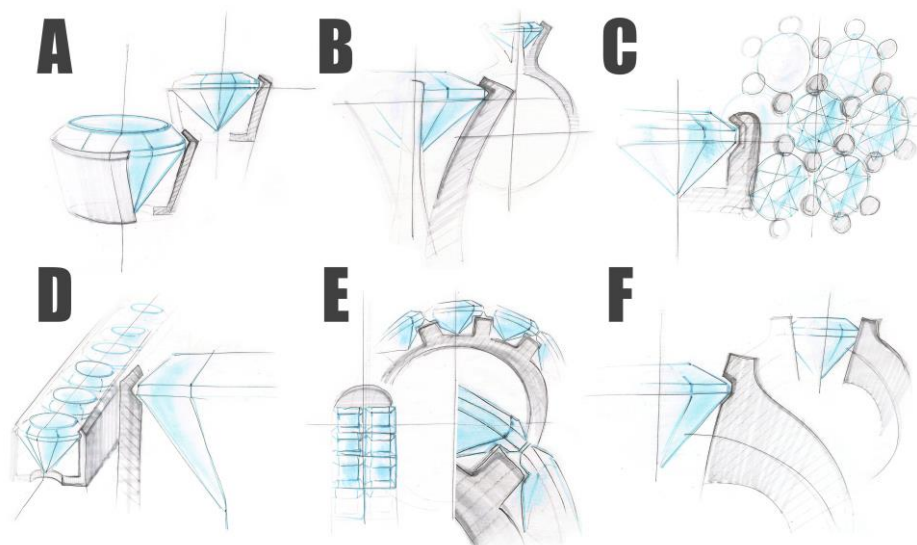
Nesse entendimento, a utilização integrada entre *software Rhinoceros 3D* e *Abaqus CAE*, esse último amplamente utilizado em áreas da engenharia estrutural, pode auxiliar na análise inicial de modelos de joias, antes de sua fabricação em si. Os modelos desenvolvidos no *Rhinoceros 3D* podem ser exportados para o *Abaqus CAE*, *software* que realiza a análise por elementos finitos. O *Abaqus CAE* possui sistema de modelagem próprio, porém pela ampla utilização do meio joalheiro bem como pelas qualidades de modelagem do *software*, opta-se pela modelagem através do *Rhinoceros 3D*. Soma-se a isso o fato que sistema de modelagem do *Abaqus CAE* é bastante limitado se compararmos ao *Rhinoceros 3D*.

No *Abaqus CAE* é aplicado ao modelo virtual a propriedade do material desejado, bem como as condições de carregamento e de suporte, simulando aspectos do uso diário da joia. Os resultados da simulação gerados no *Abaqus CAE* permitem avaliar as tensões geradas sobre o modelo, bem como os deslocamentos e deformações. Assim são identificados pontos frágeis na estrutura ou mesmo onde pode se ter uma redução maior no material utilizado para cada joia, reavaliando assim a necessidade de aumentar ou reduzir o uso do material, buscando a otimização estrutural do qual a joia necessitará.

2.7. PONTOS MAIS FRÁGEIS AOS CARREGAMENTOS, AS CRAVAÇÕES

Entre os pontos a serem avaliados em cada projeto, as cravações definem o limite crítico para qualquer tensão e deformação gerada sobre a joia, onde pequenas alterações morfológicas podem desprender as gemas engastadas. Faz-se assim necessários compreender quais as cravações mais utilizadas, bem como o sistema funcional que cada uma possui. As técnicas de cravação evoluíram juntamente com a criação de novos tipos de lapidação. Mesmo no período em que eram feitas com a técnica martelada, na qual basicamente o metal era expandido sobre as laterais para fixá-la, deveriam acompanhar a silhueta disforme e única que cada gema exigia. Segundo A Cravação (2010), com o início de lapidações de gemas com maior precisão é que começaram a surgir novas técnicas de cravação, no qual o mineral pode ser exposto de modo mais limpo, sem demasiada interferência do metal sobre o mesmo, expondo-o mais à luz, o que dá mais brilho, além de mostrar toda a sua beleza interna e externa. Dentre as mais usuais estão à cravação inglesa, com garras, pavê, trilho, invisível e tensão (Figura 9).

Figura 9 – Cravações comumente utilizadas. (A) Cravação inglesa; (B) Cravação com garras; (C) Cravação pavê; (D) Cravação trilho; (E) Cravação invisível; (F) Cravação tensão.



A cravação inglesa, também chamada de besel é dada por estudiosos como a primeira técnica de cravação propriamente dita. Trata-se da evolução da cravação martelada, e apesar de antiga, continua sendo bastante utilizada no meio joalheiro, principalmente na fixação de cabochões. Consiste em utilizar uma cinta de metal no entorno da pedra, chamada de virola, no tamanho exato a formar uma auréola na qual a pedra fica totalmente envolta (Figura 9A). Essa característica oferece proteção à gema, evitando batidas ou desgastes que ela possa sofrer, e por isso é indicada para pedras mais frágeis, onde mesmo a garra por si só poderia danificá-la. Após a colocação da pedra na posição correta, a borda superior do metal é martelada ou projetada com auxílio de buril até cobrir, de acordo com A Cravação (2010), não mais que 10% da superfície da pedra, criando assim a sua fixação. A cravação inglesa dá uma ênfase maior ao metal que à gema em si, porém pode conferir um bonito e rico efeito, o que varia de acordo com a especificação de cada joia.

A cravação com garras, também chamada de cravação com grifas, data do período do Renascimento, onde entre 1300 a 1650. Pinillos e Gavrilko (2009) relatam o início da utilização de garras soldadas ao redor de anel, para se engastar gemas. Caracterizada por sua versatilidade e reduzido uso de material, adapta-se basicamente a todo tipo de gemas. Possui o conceito simples, no qual usualmente 3, 4 ou 6 garras de metal são dobradas sobre a borda da pedra firmando-a contra a caixa ou chatão, local em que a gema é acomodada (Figura 9B). A versão como a conhecemos popularizou-se a partir de 1886, onde segundo A Cravação (2010), Charles Tiffany aprimorou seu uso como uma forma de enfatizar a gema em relação ao metal que a segura. Fazendo uso de garras espaçadas, tem-se a pedra mais elevada que a base do anel o que por consequência permite uma maior passagem de luz pela gema, intensificando o seu brilho. Utilizada inicialmente para pedras redondas, a cravação com garras teve a aplicação difundida para as mais variadas formas de gemas, permanecendo sua característica básica, o uso de grifas dobrados sobre a gema. Essas grifas podem variar de cilíndricas, quadradas, triangulares, ponta chata ou mesmo ponta boleada.

A pavimentação da chapa metálica onde as gemas são perfeitamente dispostas, é o conceito que envolve a cravação pavê, com nome de origem francês.

Para isso, minúsculos grãos são erguidos na superfície do metal, chamados granitos, montando uma cadeia de estruturas milimetricamente calculadas, que tem por finalidade fixar e cobrir a superfície de gemas dispostas normalmente em estruturas que lembram uma rua pavimentada ou mesmo favos de mel (Figura 9C). Muito utilizada na alta joalheria, Rosetti (2011) salienta as variações na disposição com 5 pedras, 6 pedras e a mais popular e sofisticada, 7 pedras. Geralmente utilizada em gemas redondas, essa técnica requer usualmente um design prévio acerca da disposição das gemas, estando diretamente ligado à capacidade do joalheiro. A cravação pavê é uma variação da granitada, onde o princípio básico está em fixar as gemas através dos minúsculos grãos erguidos na superfície do metal, essa muito aplicada no engaste individual de gemas ou mesmo em gemas agrupadas para formar carreiras.

Na cravação trilho, carril ou canal, duas fendas são abertas nas laterais opostas do metal, formando uma espécie de trilho ou canal no qual as gemas são encaixadas uma após a outra, sem necessidade de granitos entre elas (Figura 9D). Comumente utilizado em gemas retangulares, quando a cravação for linear e houver uma barra de metal entre as gemas, pode ser chamada de cravação barra. De acordo com A Cravação (2010), o canal é uma variação da letra U, no qual os lados são um pouco mais estreitos que a espessura das gemas a serem cravadas. Essas são colocada entre os entalhes e o metal do topo é puxado para baixo, firmando-as no lugar. Essa técnica de cravação proporciona muita segurança às gemas, que de modo geral ficam protegidas de desgastes e batidas.

A cravação invisível, também chamada de misteriosa, foi desenvolvida pela joalheria Van Cleef & Arpels. A técnica consiste em engastar as gemas em uma malha de metal que passa abaixo da cintura da gema (Figura 9E). Cada uma é preparada para que se encaixe sob pressão à malha do metal, e para isso devem ter as dimensões exatas. Tais especificações a torna a mais elaborada das cravações, o que ratifica A Cravação (2010), pois exige grande precisão para que as pedras se ajustem perfeitamente umas nas outras sem deixar espaços aparentes. Possibilita uma grande superfície contínua de pedras sem a interferência do metal, o que dá um aspecto sofisticado à joia. Porém possui a fragilidade como ponto negativo, pois submetida a impactos, algumas gemas podem desprender-se.

A cravação tensão tem a gema é fixada ao metal pela força de tensão que esse exerce sobre ela (Figura 9F). Para tanto, dois sulcos são feitos na lateral interna para o encaixe da pedra. Rosseti (2011) reforça que o metal utilizado para esta técnica não pode ser muito macio, pois se assim for não conseguirá exercer pressão, ao menos que seja muito espesso.

A estrutura mais utilizada para a cravação das gemas feitas ainda na cera segue os mesmos princípios que a pavê ou granitada, na qual se tem a disposição de granitos milimetricamente calculados com a finalidade de fixar as gemas. A diferença é que a cravação das gemas é feita no modelo em cera, não mais no metal, possibilitando um custo muito menor e um resultado melhor. Esse modelo em cera será transformado em metal pelo processo de fundição por cera perdida. Essa técnica ocorreu graças ao avanço dos softwares CAD/CAM que possibilitam a modelagem virtual das peças e a confecção através de processos de subtração e adição de material. Nesse ramo, os métodos aditivos vem abrindo caminhos para novos modelos em resina, ampliando as possibilidades para a criação de joias e nos quais as cravações acompanham esse novo desenvolvimento tecnológico.

2.7.1 Considerações:

O levantamento informacional acerca das diversas esferas do conhecimento que envolvem o projeto, a exemplo da engenharia estrutural e do design de joias, abordados nesse capítulo, auxiliam na elaboração do método de pesquisa. Esses contribuem com conhecimentos necessários, norteando a evolução da pesquisa, mesclando áreas que abordam: (i) a engenharia e análise estrutural; (ii) hipóteses simplificadoras quanto ao material, à geometria, as solicitações e as condições de suporte; (iii) propriedades mecânicas envolvidas; (iv) propriedades do latão, da prata e do ouro; (v) dados e impactos acerca da extração dos metais utilizados; (vi) processos produtivos da indústria joalheira; (vii) sistemas CAD/CAM para joalheria; (viii) pontos mais frágeis aos carregamentos, às cravações.

METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia utilizada na pesquisa faz uso do estudo exploratório inicial, fase em que são abordados conceitos que abrangem o ponto central da pesquisa, a aplicação do *software Abaqus CAE, versão 6.14*, disponível no Laboratório de Design Virtual da UFRGS, para simulação de carregamentos em modelos de joias gerados no *software Rhinoceros 3D, versão 5 SR8*. Testa-se a viabilidade de aplicação, e compatibilidade entre os sistemas e *softwares* a serem utilizados em uma análise de caráter puramente exploratório e direto. De acordo com Gil (2010), a pesquisa exploratória objetiva proporcionar familiaridade com o problema, com o intuito de torná-lo mais explícito.

Comprovada a factibilidade da pesquisa, a etapa seguinte buscou a contextualização do estudo, abordando questões introdutórias, temáticas, problemáticas, objetivas e justificativas. É análoga à fase inicial de projetos, denominada como problematização, proposta por Bonsiepe *et al.* (1984) na qual a contextualização é facilitada e enriquecida quando são postas questões do tipo “o que”, “porque” e “como”.

Após ser contextualizada, a pesquisa avança para a etapa de verificação. Essa compreende o levantamento bibliográfico pertinente aos conceitos que auxiliem no desenvolvimento direto ou indiretos das análises posteriores. Gil (2010) ressalta que a vantagem da pesquisa bibliográfica é que permite ao pesquisador a abordagem de fenômenos de modo muito mais amplo do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Nesse entendimento, o levantamento bibliográfico aborda tópicos que contemplam a engenharia e análise estrutural, hipóteses simplificadoras quanto ao material, geometria, solicitações e condições de suporte, as propriedades mecânicas envolvidas, as propriedades dos materiais amplamente utilizados no meio

joalheiro, os dados e impactos sobre extração dos metais utilizados, os processos produtivos utilizados no setor em questão, o foco no processo de fundição por cera perdida, os sistemas CAD/CAM utilizados na produção de joias e os pontos mais frágeis aos carregamentos, às cravações.

A próxima etapa compreende a análise laboratorial, na qual são identificados os métodos e as técnicas a serem empregadas no processo de modelagem e simulação. Modelos e técnicas desenvolvidas durante o estudo exploratório auxiliam no delineamento dessa etapa. Define-se os tipos de joias que serão abordadas, a exemplo de um anel, brinco, pingente, com cravação de gemas ou não. Determinam-se quais as situações cotidianas serão simuladas, como meio de carregamentos bem como a configuração e o grau das condições de suporte para cada análise. Estabelecem-se quais os índices tolerados de tensão e deslocamento enfatizando as cravações como os pontos mais críticos.

Estabelecido os métodos, técnicas e parâmetros analíticos a etapa subsequente foca no estudo de caso aplicado. Gil (2010) reforça que o estudo de caso é qualificado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, permitindo o seu conhecimento extenso e minucioso. Análogo à análise sincrônica proposta por Bonsiepe *et al.* (1984), é feito o estudo dos produtos disponíveis no mercado e a partir desses a modelagem virtual detalhada de corpos de provas nomeados “amostras de mercado”. Outros corpos de prova são gerados de acordo com as indicações dadas pela bibliografia de Rosetti (2011), nomeados “amostras indicadas por bibliografia”. Todas submetidas às simulações com configurações determinadas na fase de análise laboratorial a fim de formarem um comparativo entre o que é ofertado, o que é indicado e quais contribuições e alterações projetuais a pesquisa pode proporcionar a essas amostras.

Findo o processo, tem-se a etapa de documentação, a qual abrange a apresentação dos resultados e o fechamento da dissertação. Espera-se que os resultados identifiquem pontos de melhoria nos projetos, seja para redução ou redistribuição de material e mesmo reestruturação da forma, adicionando a cada projeto um parecer sobre o comportamento da estrutura em uso.

Os itens 3.1 e 3.2 descritos a seguir abordam como ocorre o processo de preparação dos corpos de prova e configuração da análise.

3.1. PREPARANDO O CORPO DE PROVA

O estudo exploratório utilizou como corpo de prova uma meia aliança modelada no *software Rhinoceros 3D* (Figura 10). O diâmetro interno do anel é de 18,2 mm, o diâmetro externo corresponde a 21,00 mm e a largura é de 4,50 mm. Nessa etapa, manteve-se aspectos formais simplificados para facilitar o entendimento e a compreensão dos resultados obtidos nas simulações de cargas, não abordando nesse primeiro momento as cravações. Como método de exportação utilizado optou-se pela extensão *IGES (*.igs, *.iges)* na opção *SolidWorks solids*, o qual possui uma boa compatibilidade no reconhecimento de malha pelo software *Abaqus CAE* (Figura 11).

Figura 10 – Meia aliança, utilizada como corpo de prova nesta pesquisa, obtida por modelagem em mm no *software Rhinoceros 3D*.

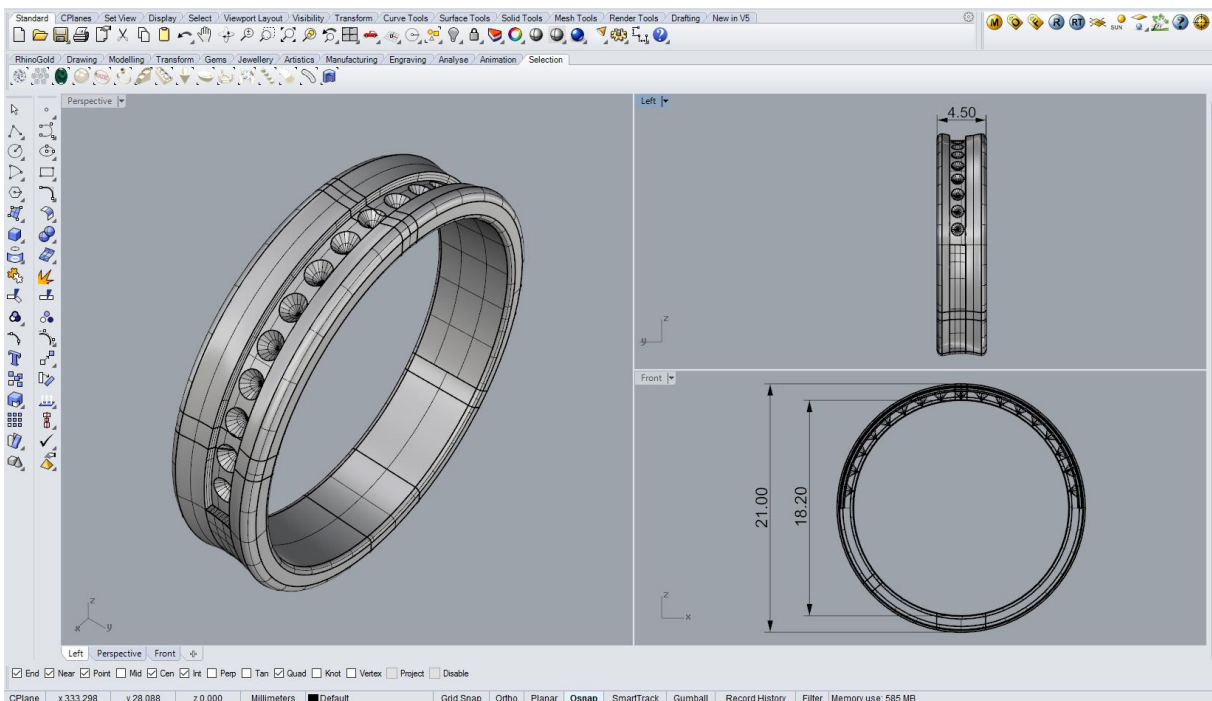
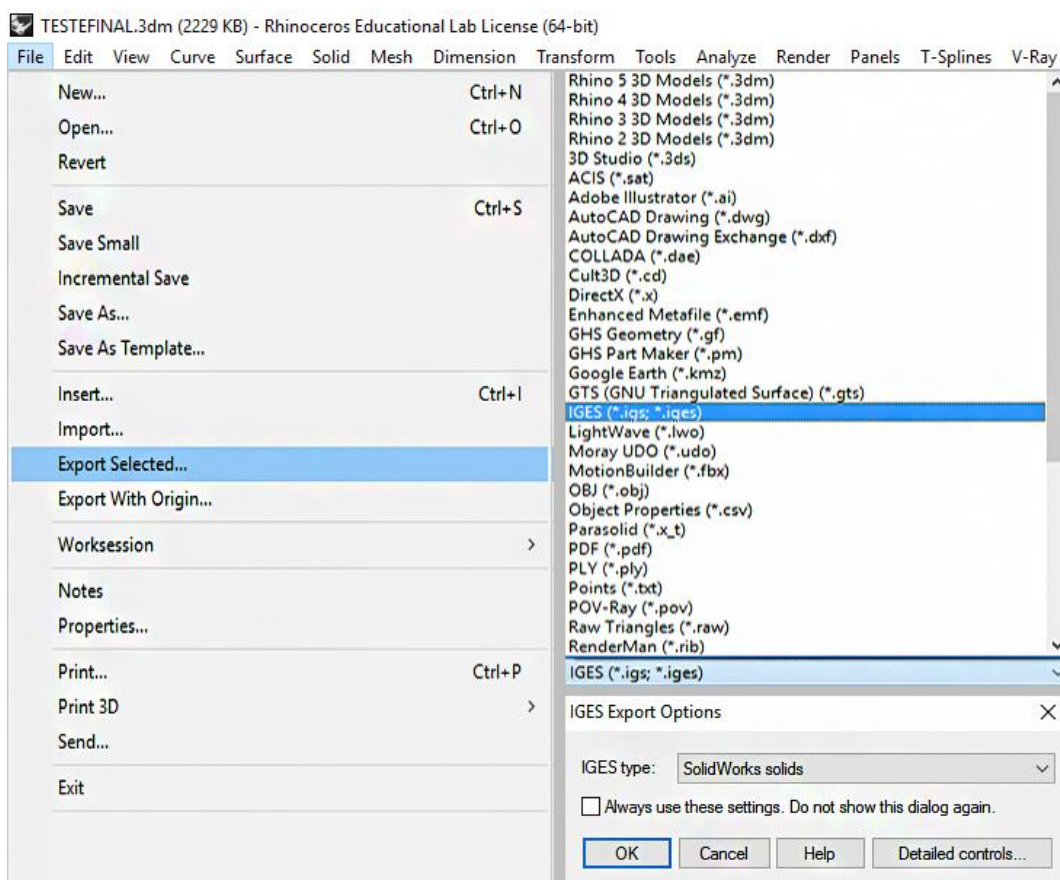


Figura 11 – Processos de exportação disponíveis no *software Rhinoceros 3D*, indicando a extensão selecionada IGES (*.igs, *.iges) na opção *SolidWorks solids*.

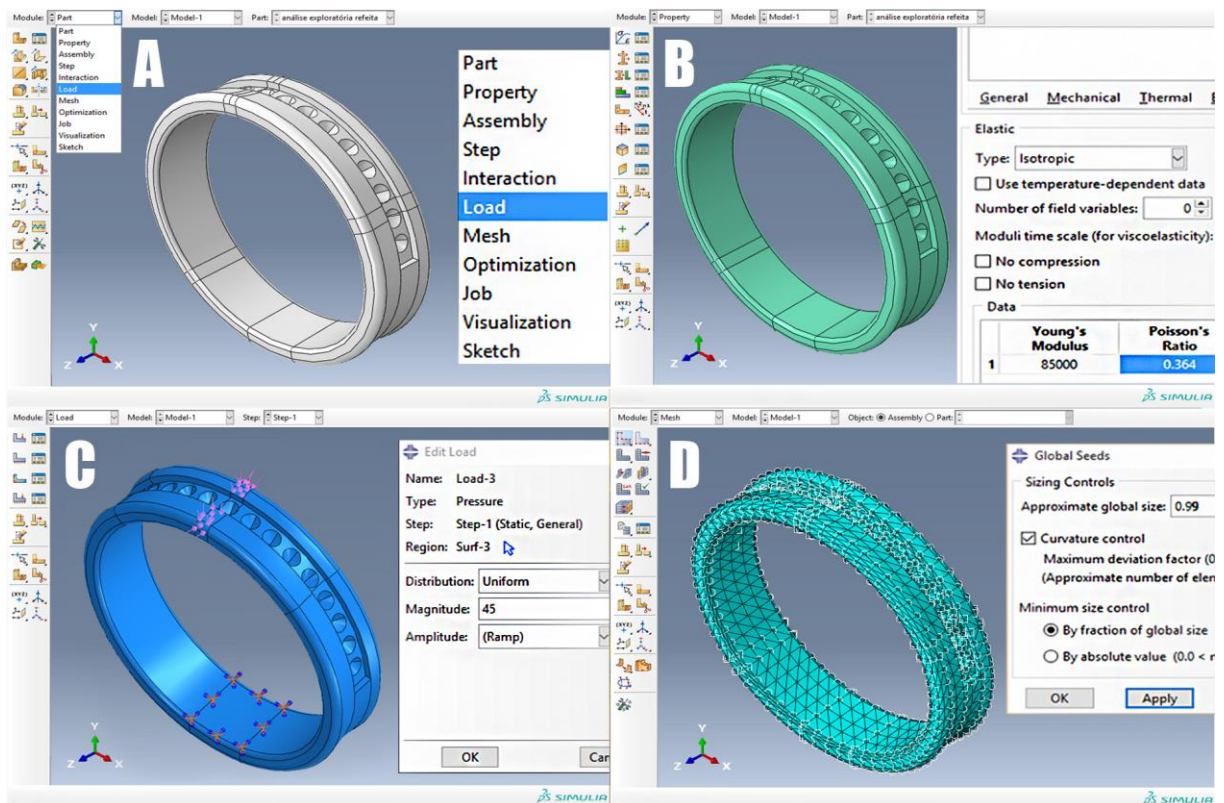


3.2. CONFIGURANDO A ANÁLISE

O processo de simulação das joias em condições de uso requer alguns passos, requisitos que precisam ser fornecidos ao *software Abaqus CAE*, (Figura 12). Em um primeiro momento é feito a importação do arquivo em extensão *IGES (*.igs, *.iges)* para o *software*. O próximo passo, denominado *part* possibilita a modelagem virtual pelo *Abaqus CAE*. Porém devido às qualidades do *Rhinoceros 3D* para a modelagem, bem como o uso difundido pela indústria joalheira, a modelagem é importada do *Rhinoceros 3D*. Iniciando a configuração no *Abaqus CAE* pelas propriedades do material, as quais são especificadas no passo *property*, em *create material; mechanical; elasticity; elastic*. Para a análise foram considerados o módulo

de elasticidade e o coeficiente de Poisson, pois com essas propriedades mecânicas pode-se compreender o comportamento que o material terá dentro do regime elástico, ou seja, deformações não permanentes e com a retirada das forças a joia voltará à sua forma original. Para a análise inicial foram adotadas as propriedades da prata 925, material amplamente utilizado para a confecção de jóias, que possui coeficiente de Poisson 0,364, módulo de elasticidade de 85 GPa e limite de escoamento de 124 MPa. Ainda em *property; create section* é criada a seção em que o material será aplicado através do comando *assign section*.

Figura 12 – (A) Passos para a configuração da simulação; (B) Configuração das propriedades; (C) Aplicando os meios externos de atuação; (D) Gerando a malha.



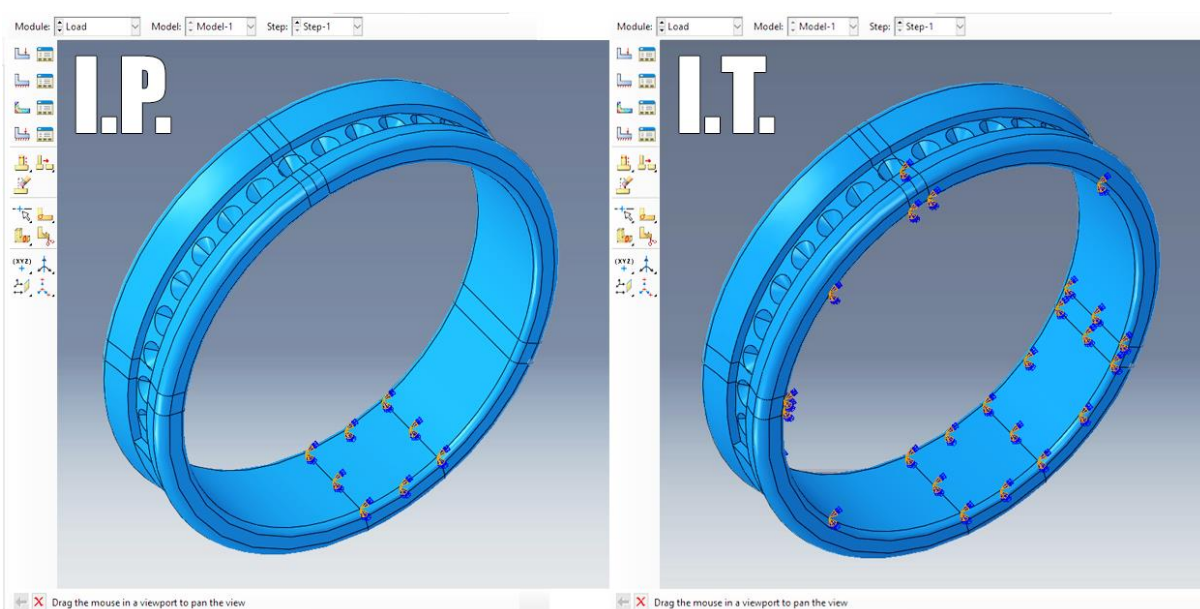
Na aba *assembly; create instance* é realizado a junção das partes da modelagem importadas do software *Rhinoceros 3D*, e nessa etapa deve-se marcar a opção *independent* em *instance type* para que se consiga aplicar a malha sobre o modelo, posteriormente. Em *step; create step* são determinados os passos de cálculo para simulação, nesse caso, correspondente a faixa em que o material tem

deformação linear, mantendo-se a opção *static, general* como padrão. Em *load; create load*, são determinados os carregamentos que agem sobre a estrutura, bem como as condições de contorno em *create boundary condition*. Com finalidade de testar a estabilidade da estrutura da meia aliança, foram estipuladas dois carregamentos de caráter externo.

- O primeiro corresponde ao simples choque mecânico, em áreas concentradas, na superfície externa, que a aliança possa sofrer ao colidir contra um corpo. Em exemplo prático, seria um usuário batendo a mão contra uma parede, mesa, uma situação cotidiana. Adota-se como referência uma mulher de 90 kg, já que peso médio de uma mulher brasileira que de acordo com os dados do IBGE (2008-2009) variam ao longo da vida adulta entre 55 kg a 65 kg, optou-se por ampliar essa margem em 30% abrangendo uma faixa maior, considerando momentos de vida atípicos a exemplo da gestação. Com essa premissa o peso correspondente a um membro superior é de aproximadamente 4,5 kg, pois de acordo com Hall (2012) o mesmo equivale a aproximadamente 5% do total do peso corporal. Considerando um movimento de braço com aceleração média de 1 m/s^2 , bem como a gravidade da Terra como 10 m/s^2 , tem-se uma força resultante de 45 newtons exercida na aliança. Adota-se a gravidade no somatório da força para abranger o pior caso nesse tipo de choque, em sentido vertical de deslocamento.
- O segundo carregamento, com carga distribuída em 1/8 da superfície externa, simula diversas atividades, como a pressão exercida na aliança ao carregarmos uma mala pesada ou ao praticar atividades físicas que requeiram as mãos como apoio para parte do peso corporal. Para tanto foi considerado a metade do peso da mulher, 45 kg, logo a força resultante de 450 newtons. Em ambos os casos as cargas foram aplicadas e mantidas em atuação na estrutura.

Os dois casos de carga analisados foram aplicados com duas condições de contorno diferentes. Na primeira, toda superfície interna do anel é fixa, simulando uma situação do anel em um dedo totalmente rígido e sem escorregamento entre a pele e o metal. Na outra condição, o anel está fixo apenas na face inferior da superfície interna, denominado de interno parcial, simulando uma situação em que o dedo não ofereça impedimento à deformação do anel (Figura 13). Estas duas situações representam os casos limite e em utilização real o anel estará submetido a uma condição de restrição intermediária.

Figura 13 – (I.P.) Face inferior da superfície interna fixa, denominado interno parcial; (I.T.) Superfície interna totalmente fixa, denominada interno total;



O próximo passo, denominado *mesh*, converte a modelagem computacional em malha, realizando o processo de discretização, ou seja, resulta no modelo discretizado. Esse processo possibilita um maior ou menor refinamento da malha, através do comando “*seed part instance*”, conforme as necessidades de cada projeto. Em *assing mesh controls* é possível determinar se a construção da malha ocorrerá através de elementos hexagonais ou tetragonais, sendo utilizado para a análise a segunda opção.

Na aba *job*, em *create job*, são criados os cálculos com os parâmetros pré-indicados nas etapas anteriores, e em *job manager*, submit são realizados os

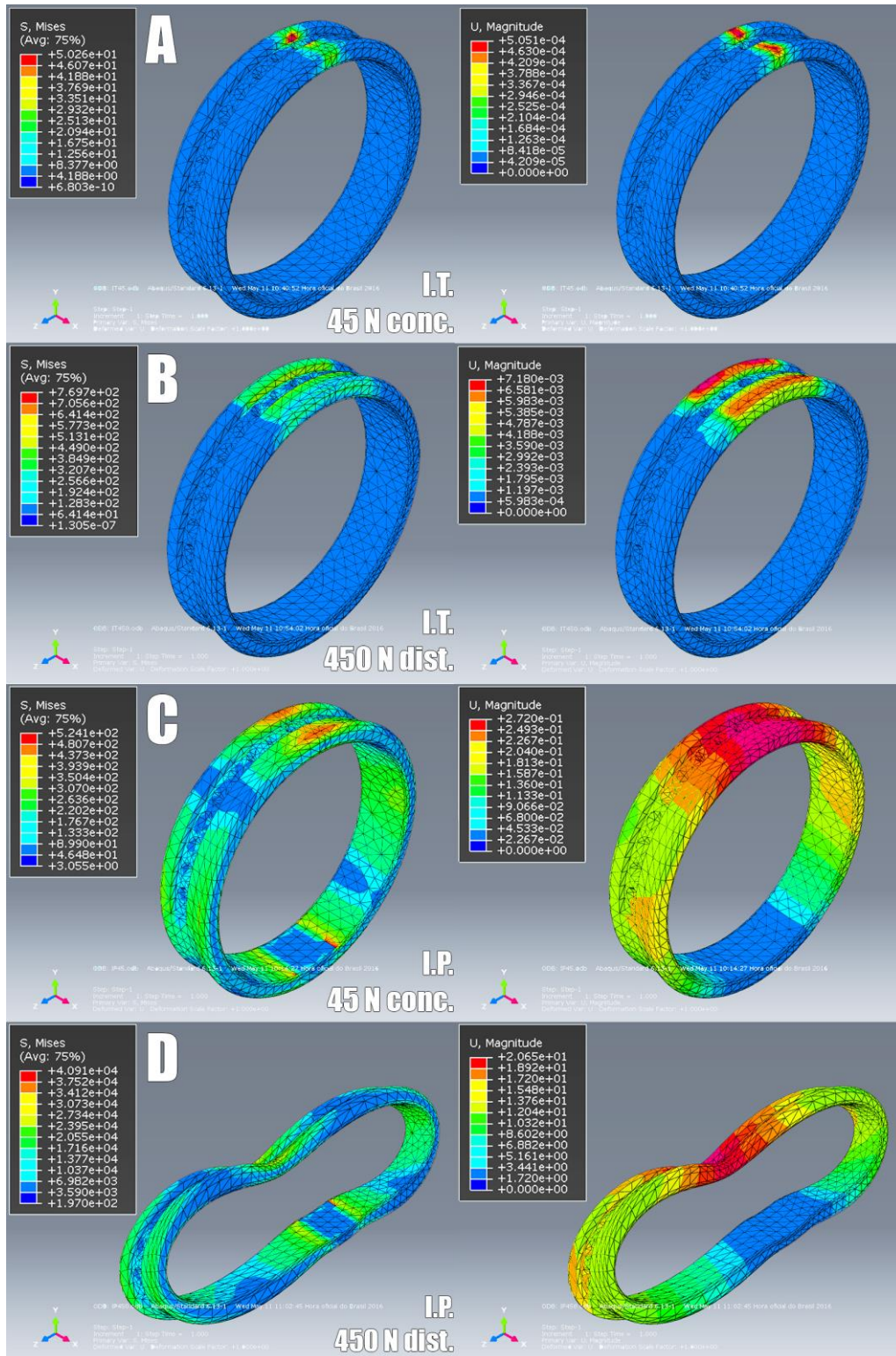
cálculos enquanto que a aba *visualization* possibilita a visualização dos resultados da simulação.

3.3. RESULTADOS PRELIMINARES

Com o corpo de prova da análise exploratória submetido aos testes, com as configurações destacadas anteriormente, foram obtidos quatro resultados de tensões em von Mises e deslocamentos em magnitude (Figura 15). A tensão de von Mises, também chamada de teoria da energia de distorção máxima indica que o escoamento de um material sólido ocorre quando a energia associada à mudança de forma de um corpo sob carregamento multiaxial atinge um valor crítico para um dado material. De acordo Ottosen e Ristinmaa (2005) o critério de von Mises pode ser interpretado dizendo que o escoamento inicial ocorre quando a energia desviatória de tensão atinge um determinado valor.

Quanto às cargas aplicadas, no caso A e C é de 45N concentrada, enquanto que no caso B e D é aplicada uma carga de 450N distribuída ao longo de um 1/8 da superfície externa do anel. As condições de contorno no caso A e B são a restrição de todos os graus de liberdade, ou seja, o engaste, que nesse caso ocorre ao longo de toda superfície interna da aliança. No caso C e D as condições de suporte também são engastes, porém ocorrem em apenas uma parte da superfície interna (Figura 14). Os resultados obtidos foram agrupados no Quadro 3.

Figura 14 – Resultados da análise exploratória obtidos no software Abaqus. Anéis a esquerda mensuram tensões de von Mises (MPa); Anéis a direita mensuram deslocamentos em magnitude (mm).



Quadro 3 – Resultados da análise exploratória, obtidos através do *software Abaqus*, para as diversas situações de contorno. Os índices destacam os máximos valores de tensão e de deformação obtidos em cada caso.

Caso	Tensão (von Mises)	Deslocamento (Magnitude)	Força	Engaste
A	+5,026 x 10 ¹ MPa	+5,051 x 10 ⁻⁴ mm	45N concentrado	Interno total
B	+7,697 x 10 ² MPa	+7,180 x 10 ⁻³ mm	450N distribuída	Interno total
C	+5,241 x 10 ² MPa	+2,720 x 10 ⁻¹ mm	45N concentrado	Interno parcial
D	+4,091 x 10 ⁴ MPa	+2,065 x 10 ¹ mm	450N distribuída	Interno parcial

3.4. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Com as simulações pode ser constatado que os índices de deslocamento em A, B e C são extremamente baixos. No caso A, a tensão gerada ficou dentro dos parâmetros em que o material possui comportamento elástico e, em B, C e D, as tensões superaram o ponto de escoamento do material, imposto em 124 MPa. O ponto mais crítico para deformações situa-se na região das cravações, onde pequenas movimentações localizadas de materiais pode fazer com que as gemas se soltem. Estudos posteriores estabelecerão índices de tolerância de deformações para os principais tipos de cravações utilizados. No caso D, constatou-se um alto índice de deslocamento, atingindo o valor máximo aproximado de 20 mm, o que corresponde a aproximadamente 100% da dimensão inicial do anel.

Os resultados preliminares comprovam que o método utilizado possibilita a simulação e avaliação de joias sob condições de carregamento. Para tanto, devem ser refinadas as situações de carregamento para que possam ser as mais próximas possíveis das condições reais, bem como às condições de suporte. Quanto a essa última, a continuidade do estudo pretende simular uma situação em que a condição não seja um engaste, mas sim um aproximado da situação real, alocado em um sólido o qual será configurado para possuir as propriedades do dedo humano.

REFINAMENTO DO MÉTODO

O presente capítulo tem como objetivo definir e refinar quais joias são utilizadas como corpo de prova, bem como quais as condições de contorno serão empregadas efetivamente. Com o fechamento desses pontos, são aplicadas as novas análises, tendo nessa etapa o direcionamento ao que é ofertado no mercado bem como ao que é indicado via bibliografia aos profissionais em formação.

4.1. DETALHAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Dentre as diversas joias existentes, os anéis são considerados como foco para a pesquisa. Tal escolha, deve-se ao fato desses objetos serem submetidos a diversas condições de estresse mecânico, por seu local de uso. Assim são expostos a cargas aplicadas nas diversas atividades do cotidiano que realizamos com o uso das mãos.

Como modelo de anel, define-se a utilização de meia aliança, joia amplamente difundida no meio comercial. Delimitam-se àquelas compostas por uma carreira de gemas, a qual corresponda entre $1/4$ a $1/2$ do perímetro do anel e que tenha sido fabricada com cravação em cera, seguido o princípio da cravação granitada. A escolha dessas, deve-se ao fato de mesclarem a utilização de metal e gemas através de um método de cravação muito utilizado atualmente na produção de joias em larga escala. Outro fator é o nível de precisão requerido pela cravação especificada, a qual possibilita o engaste de gemas de 1mm, e, portanto,

extremamente crítico para os possíveis descolamentos que o metal sofra perante algum carregamento mecânico.

Quanto às gemas, o foco é a utilização da zircônia, amplamente difundida no meio comercial em joias de ouro, prata e folheados, por sua semelhança com o diamante. Para as propriedades da zircônia utiliza-se os dados de Yamashita, Kudo e Tsukuma (2012), no qual o módulo de elasticidade é mensurado em 200 GPa, o coeficiente de Poisson em 0.32 e a densidade em $5.83 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$. Para zircônia considera-se comportamento elástico até a tensão de ruptura, mensurado por Grady (1994), em 7,4 GPa.

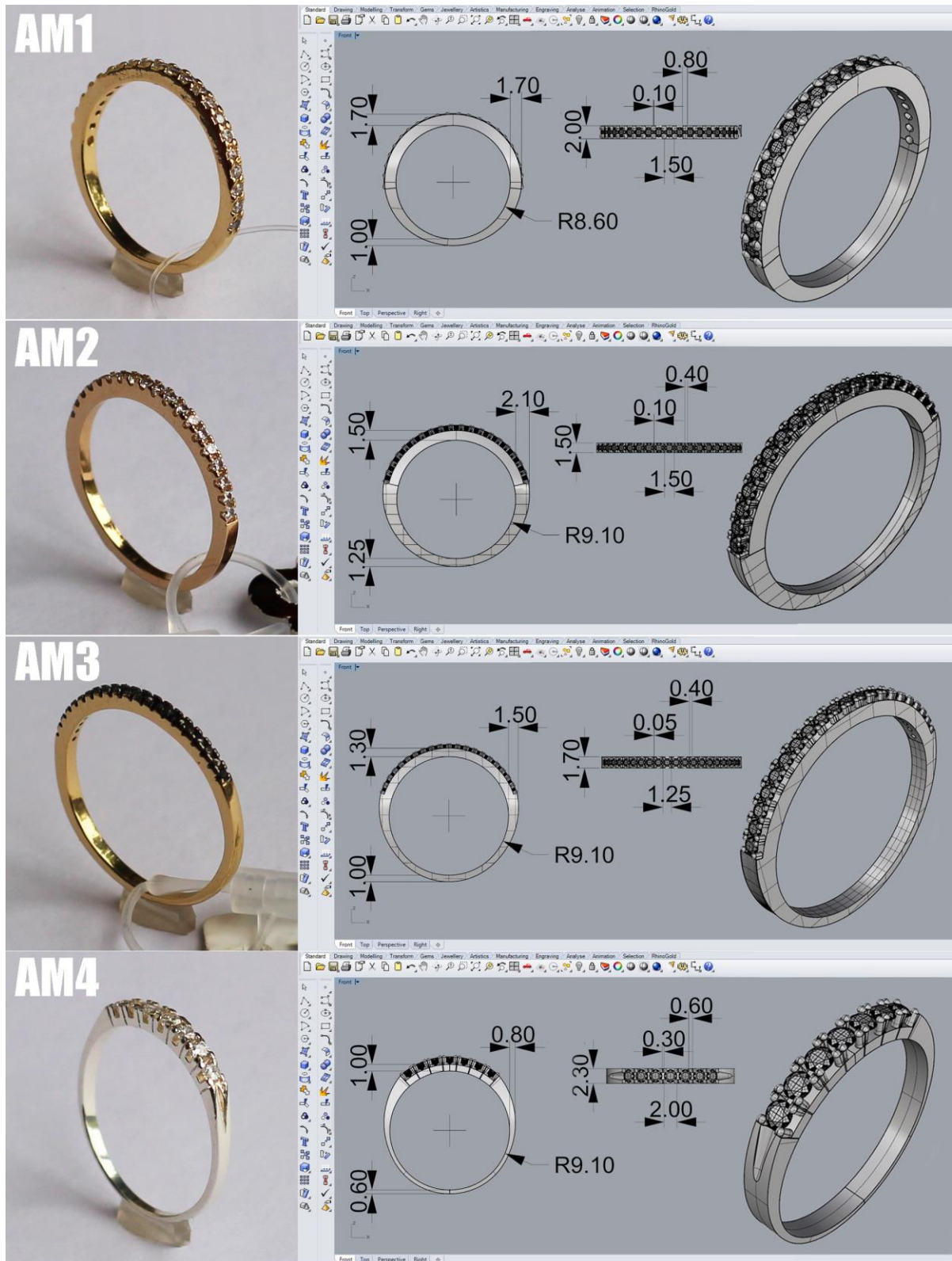
Com essas premissas os corpos de prova foram divididos em amostras de mercado, aqueles adquiridos no meio comercial, e amostras indicadas por bibliografia, aqueles gerados a partir de indicações da bibliografia de Rosetti (2011).

Para compor os corpos de prova denominados amostras de mercado foram adquiridos quatro modelos similares de meia aliança, porém de diferentes fabricantes. A partir das especificações comerciais adquiridas no momento da compra, as amostras foram classificadas e nomeadas do seguinte modo:

- AM1 – em latão folheado a ouro, possui 21 gemas zircônia de 1,50mm de diâmetro e numeração 17, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 17,20mm.
- AM2 – em latão folheado a ouro, possui 19 gemas zircônia de 1,50mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm.
- AM3 – em latão folheado a ouro, possui 20 gemas zircônia de 1,25mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm.
- AM4 – em prata 925, possui 7 gemas zircônia de 2,00mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm.

Os anéis foram minuciosamente medidos com o uso de um paquímetro digital da marca ZaaS e transpostos para o meio digital através do *software Rhinoceros 3D* (Figura 15).

Figura 15 – Transposição das amostras de mercado reais para o meio digital através do software *Rhinoceros 3D*.



A NBR 16058:2013 padronizou a classificação referente ao tamanho dos anéis. De acordo com a mesma, anéis com diâmetro interno de 17,19 correspondem a numeração 14 enquanto que com diâmetro interno de 18,14 a numeração 17. A numeração fornecida pelo meio comercial está baseada no sistema antigo de medição o que mostra que a nova norma ainda está em processo de implementação.

Cabe ressaltar que AM2 e AM3 possuem matrizes produzidas pelo processo de estereolitografia o que confere extrema precisão e constância em medidas. Já AM1 e AM4 possuem matrizes produzidas pelo processo de fresagem CNC com ajustes manuais principalmente na área da cravação, o que traz certa descontinuidade e imprecisão de medidas. Ressalta-se que os processos de injeção em cera, fundição da peça e acabamento podem atuar para na má estruturação da peça. A diferença de precisão e constância pode ser observada na Figura 16, em contraponto a constância dos granitos de AM2 e AM3, os corpos de prova AM1 e AM4 possuem com granitos com face superior que varia de reta a abaulada, granitos unidos na face superior e mesmo que variam quanto à porção sobreposta na coroa da gema. Esse último ponto é considerado o mais crítico, pois além de comprometer a estética atua diretamente para a boa ou má fixação das gemas. Para a modelagem dos corpos de prova AM2 e AM3 identificou-se a sobreposição do metal sobre a gema, mensurado em 0.17 mm e 0.12 mm, respectivamente, para todos os granitos. Enquanto que AM1 e AM4 obteve-se dimensões que no primeiro variam de 0.10 mm a 0.20 mm e no segundo de 0.15 mm a 0.35 mm.

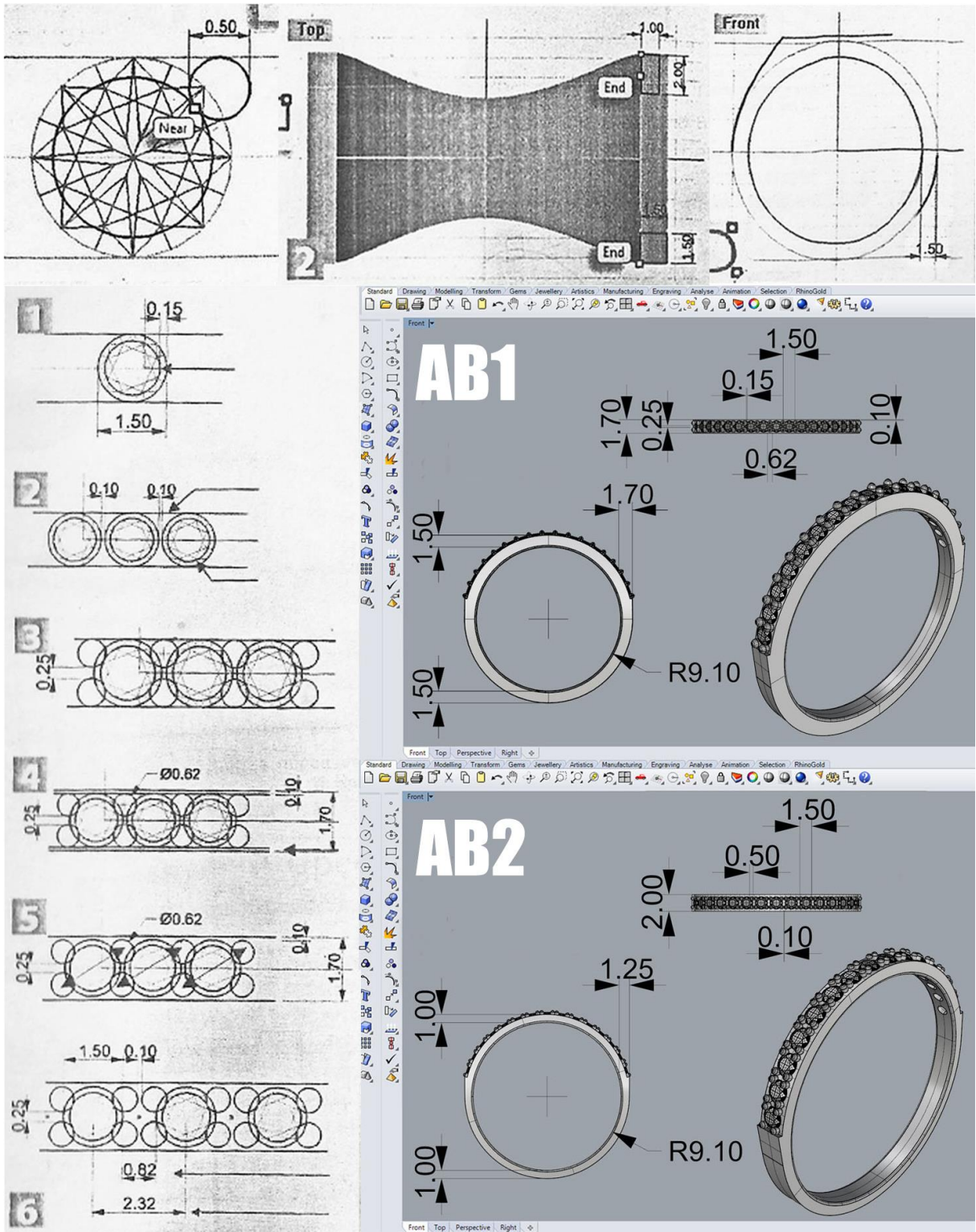
Figura 16 – Constância e precisão no dimensionamento dos granitos nos corpos de prova AM2 e AM3, em contraponto à falta dessas características em AM1 e AM4, devido a ajustes manuais



Para compor os corpos de prova denominados amostras indicadas por bibliografia foram analisadas espessuras para anéis e dimensionamentos indicados para a cravação em cera, conforme Rosseti (2011). Enfatiza-se que segundo a mesma, 10% do diâmetro da gema é o índice mínimo e usualmente trabalhado para o avanço dos granitos sobre a coroa da gema. Assim na cravação em cera de uma gema de 1,50 mm de diâmetro, a sobreposição de metal deverá corresponder a 0,15 mm. A partir dessa e demais medidas de referência indicadas, foram modelados no *software Rhinoceros 3D* dois corpos de prova nomeados AB1 e AB2 (Figura 17).

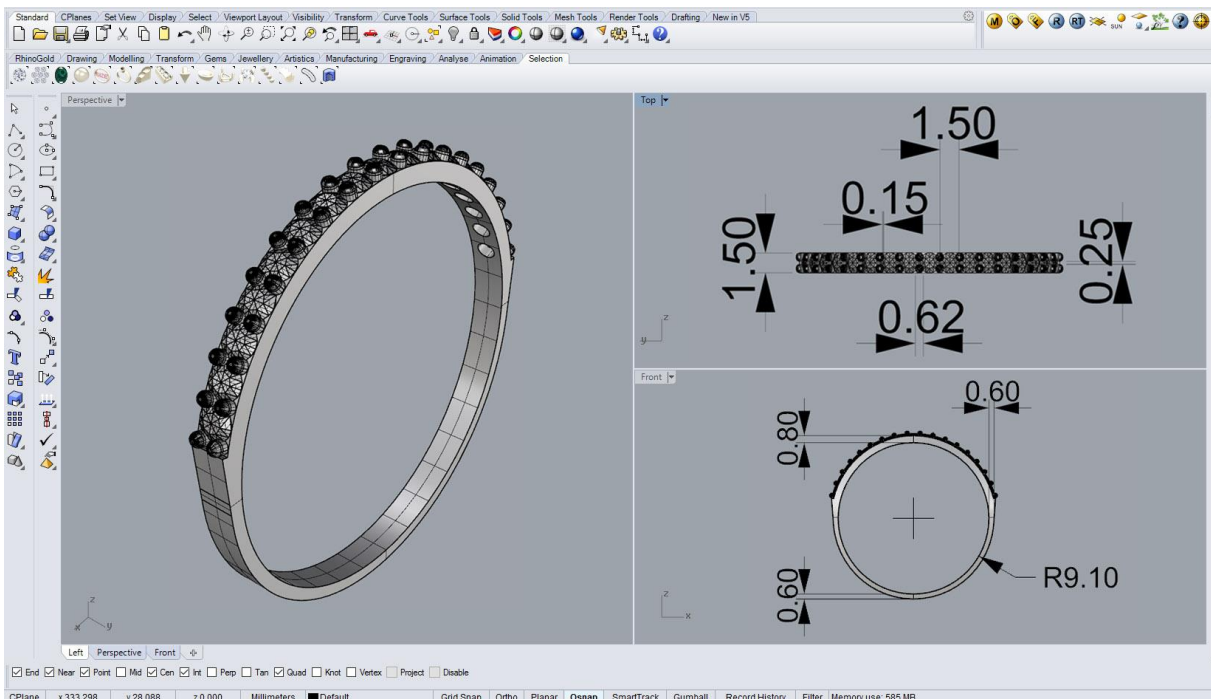
- AB1 – possui 17 gemas zircônia de 1,50mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm. Como material de referência para esse corpo de prova, aplicado nas análises, adota-se a prata 925.
- AB2 – possui 15 gemas zircônia de 1,50mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm. O latão folheado a ouro é determinado como material desse corpo de prova, a ser aplicado nas análises.

Figura 17 – Modelagem digital, no software *Rhino* 3D, das amostras indicadas por bibliografia com base em Rosseti (2011). À esquerda as indicações para a configuração da cravação e dimensionamento do corpo do anel.



O último corpo de prova possui 17 gemas zircônia de 1,50mm de diâmetro e numeração 20, o que corresponde ao diâmetro interno mensurado em 18,20mm. A modelagem mescla a cravação em cera indicada por Rosseti (2011) e grande parte da estrutura configurada com espessura 0,6 mm, limite mínimo no qual o processo de fundição é possível de ser aplicado. Projetar joias no limite de espessura é um recurso frequentemente utilizado pela indústria joalheira na fabricação de peças de ouro, onde cada grama de material tem um custo elevado. Esse é um caso recorrente, onde a margem de lucro e a estabilidade da estrutura trabalham no limiar, sendo tal amostra nomeada AL1, (Figura 18). Para as análises o material considerado na amostra é a liga de ouro branco composta por 70% Au e 30% Pt. Joias configuradas no limite mínimo de espessura são frequentemente encontradas no mercado, refletem a busca das indústrias em obterem o máximo de lucro com o mínimo de material gasto. Porém, comumente, resultam em peças frágeis com maiores índices de retrabalho, perda da joias e conseqüente insatisfação do consumidor.

Figura 18 – Modelagem digital, no software *Rhinceros 3D*, amostra AL1. Detalhamento das dimensões utilizadas na vista frontal e de topo.



Com base na modelagem 3D, mensurou-se o volume dos corpos de prova (Quadro 4).

Quadro 4 – Volumes mensurados para os corpos de prova.

Corpo de Prova	Volume
AM1	158 mm ³
AM2	152 mm ³
AM3	127 mm ³
AM4	130 mm ³
AB1	149 mm ³
AB2	113 mm ³
AL1	60 mm ³

4.2. REFINAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Dentre as condições de contorno estabelecidos no estudo exploratório e aplicadas através do *software Abaqus*, foram aprimorados os seguintes pontos:

O primeiro carregamento, que simula o choque mecânico da aliança contra uma parede ou mesa, entre outros objetos, passa a ser configurado como dinâmico. Ou seja, a carga atua em função de um determinado tempo, o que de fato ocorre em uma situação real. Para tanto é incluído um novo passo à análise selecionando a opção *dynamic, implicit* e o *time period* é definido em 10 segundos como tempo para a análise. O comportamento da carga ao longo desse tempo é determinado em *load, edit load, amplitude* selecionando-se a opção *tabular*, configura-se para que a carga atue como triangular atingindo a amplitude máxima em 1 segundo (Quadro 5).

Quadro 5 – Configuração da amplitude do carregamento em função do tempo. Amplitude máxima atingida no tempo 1 segundo, retornando amplitude mínima no tempo 2 segundos.

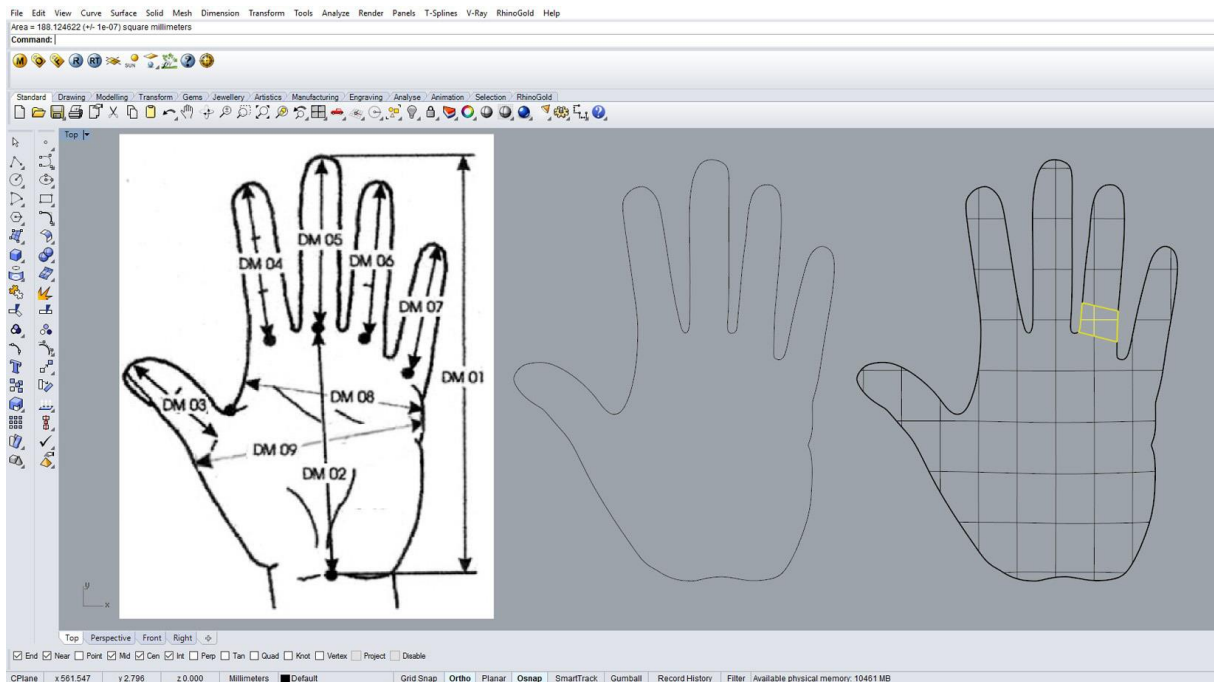
Tempo	Amplitude
0	0
1	1
2	0
10	0

Com o carregamento dinâmico, é fundamental adicionar a densidade como propriedade dos materiais. A configuração é feita em *create material; general; density* e opta-se por manter essa propriedade para as demais situações a serem analisadas.

O segundo carregamento, o qual simula atividades, com pressão exercida na aliança ao praticar atividades físicas, entre outras, foi dividido em dois, distribuindo metade para cada uma das mãos, além de considerar a distribuição dessa pressão ao longo da superfície da palma de cada mão. Para tanto toma-se como base dados antropométricos gerados por Paschoarelli et al (2010), referentes ao dimensionamento da mão esquerda de uma mulher brasileira. A partir desses é feita a modelagem de uma superfície simples no *software Rhinoceros 3D*, com o qual obteve-se a área correspondente à palma da mão, equivalente a 119,6 cm² (Figura 19). A região em que a meia aliança é utilizada, corresponde a 1,8 cm², aproximadamente 1,5% do total. Logo a carga inicial de 450 newtons é distribuída na superfície da palma da mão, sendo aproximadamente 7 newtons, o correspondente aplicado a região demarcada. Para abranger uma margem maior devido a grande variação de possíveis atividades físicas, opta-se por dobrar esse valor, considerando 14 newtons como carga de referência a um dos carregamentos. Adota-se também, como pior caso, atividades a exemplo de apoio em barra, no qual o peso do corpo humano é dividido para cada uma das mãos. Tal valor é subdividido em quatro, considerando a região dos quatro dedos em contato com a barra, que sustentam o peso; logo tem-se o carregamento de 112,5 newtons aplicados. Importante destacar

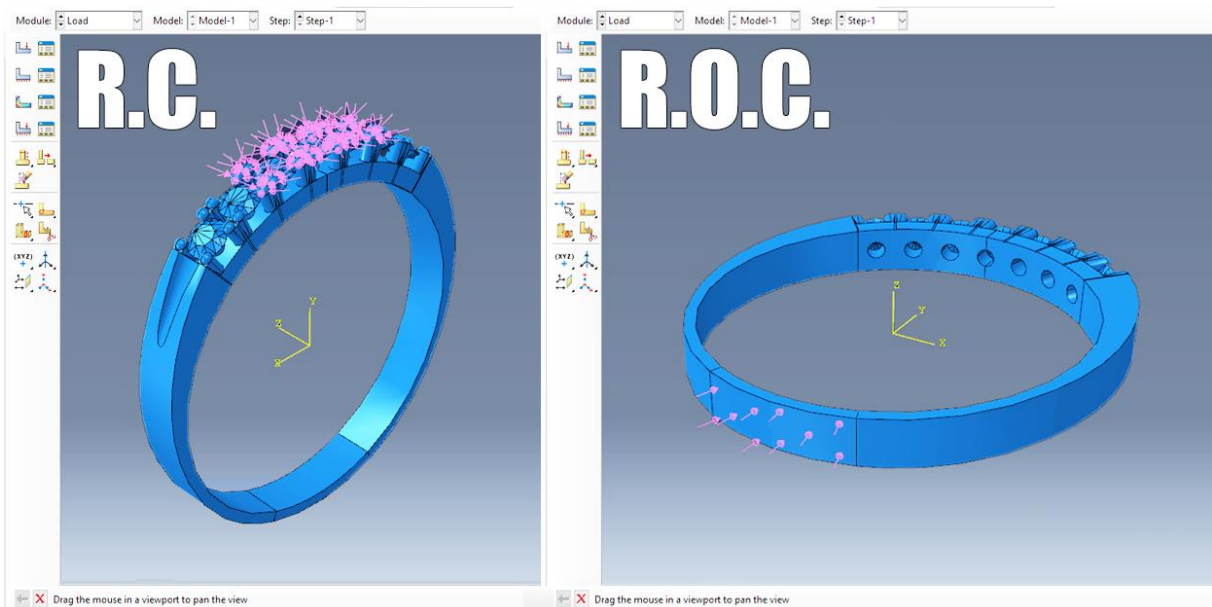
que ambos carregamentos, 14 newtons e 112,5 newtons permanecem como cargas distribuídas em 1/8 da superfície externa do anel.

Figura 19 – Processo de mensuração da área correspondente a palma da mão e a região de uso do anel, em amarelo, tomando como base o estudo gráfico dimensional de Paschoarelli et al (2010). DM corresponde aos valores de dimensionamento da mão.



Para abranger uma margem maior de situações, as cargas foram aplicadas na região da cravação, bem como no lado oposto (Figura 20). Tais pontos correspondem a porção com maior espessura, complexidade formal e presença de gemas e a porção com menor espessura, respectivamente. Além de serem os opostos a nível estrutural, esses pontos são mais suscetíveis aos carregamentos externos, uma vez que as laterais do anel tendem a ser protegidas pelos dedos.

Figura 20 – Cargas, representadas pelas setas rosas, aplicadas na região da cravação, (R.C.); Cargas, representadas pelas setas rosas, aplicadas na região oposta a cravação, (R.O.C.).



Quanto à condição de contorno, buscou-se a aproximação da situação real, substituindo o engaste interno total e interno parcial por um conjunto de sólidos com propriedades dos músculos/tendões e ossos humanos (Quadro 6), simulando um dedo no qual o anel é utilizado. Ambos sólidos são considerados elastoplásticos perfeitos, reforçando que a função desses é fornecer suporte a estrutura do anel e não identificar quando atingem o escoamento. Para o osso utiliza-se os dados de Cowin (1989) no qual a porção cortical femural possui coeficiente de poisson de 0,39 e módulo de elasticidade em seu eixo longitudinal de 17,4 GPa. Quanto à densidade, adota-se a referenciada de Pal (2014), equivalente a $1,81 \times 10^9 \text{ kg/mm}^3$. Já para músculos/tendões humanos, tem-se como referência os dados do tecido muscular esquelético, o qual segundo Herzog (2000) possui coeficiente de poisson de 0,4999 e densidade equivalente a $1,0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$. O módulo de elasticidade é referenciado por Lieber (2002) em 10 KPa. A porção definida para os tendões utiliza como base o coeficiente de poisson 0,4995, delimitado por Spyrou (2011) e o módulo de elasticidade mensurado por Lieber (2002), o qual pode chegar a 1GPa. A

densidade, de acordo com Hashemi, Chandrashekar e Slauterbeck (2005) pode variar de $7,6 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$ a $2,68 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$. Desse modo, para o conjunto músculo/tendões adota-se o coeficiente de poisson de 0.49, módulo de elasticidade de 50 MPa e densidade de $1,0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, valores dentro da margem referenciada.

Quadro 6 – Propriedades mecânicas para osso cortical, tecido muscular esquelético e tendões.

Material	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson	Densidade
Osso	17,4 GPa (longitudinal)	0,39	$1.81 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$
Músculo/tendões	50 MPa	0,49	$1,0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

Entende-se que o modelo composto por dois sólidos é uma simplificação da estrutura real que compõe o dedo. Porém cabe ressaltar que tal condição de suporte possibilita resultados mais precisos, uma vez que essa condição leva em conta a absorção dos carregamentos proporcionado pela musculatura/tendões e a resistência ao mesmos proporcionada pelo osso.

A construção dos dois sólidos teve como base as radiografias de Cadogan (2016), as quais auxiliam na correta modelagem da forma, proporção e posicionamento entre osso e músculos/tendões. A modelagem foi realizada através do *software Rhinoceros 3D*, restringindo-se a área de uso do anel, na região do osso metacarpo (Figura 21).

A nova condição de suporte, composta pelos dois sólidos é aplicada no abaquês, na aba *load*, em *create boundary condition*, selecionando o engaste na face posterior da estrutura do osso. Também é restringido o deslocamento no eixo z das faces anterior e posterior das estruturas osso e músculos/tendões (Figura 22).

Figura 21 – Construção dos sólidos que atuarão como suporte ao anel. À esquerda a modelagem com base nas radiografias de Cadogan (2016) e à direita o corte A - A' secciona a região de interesse à análise, próxima ao anel.

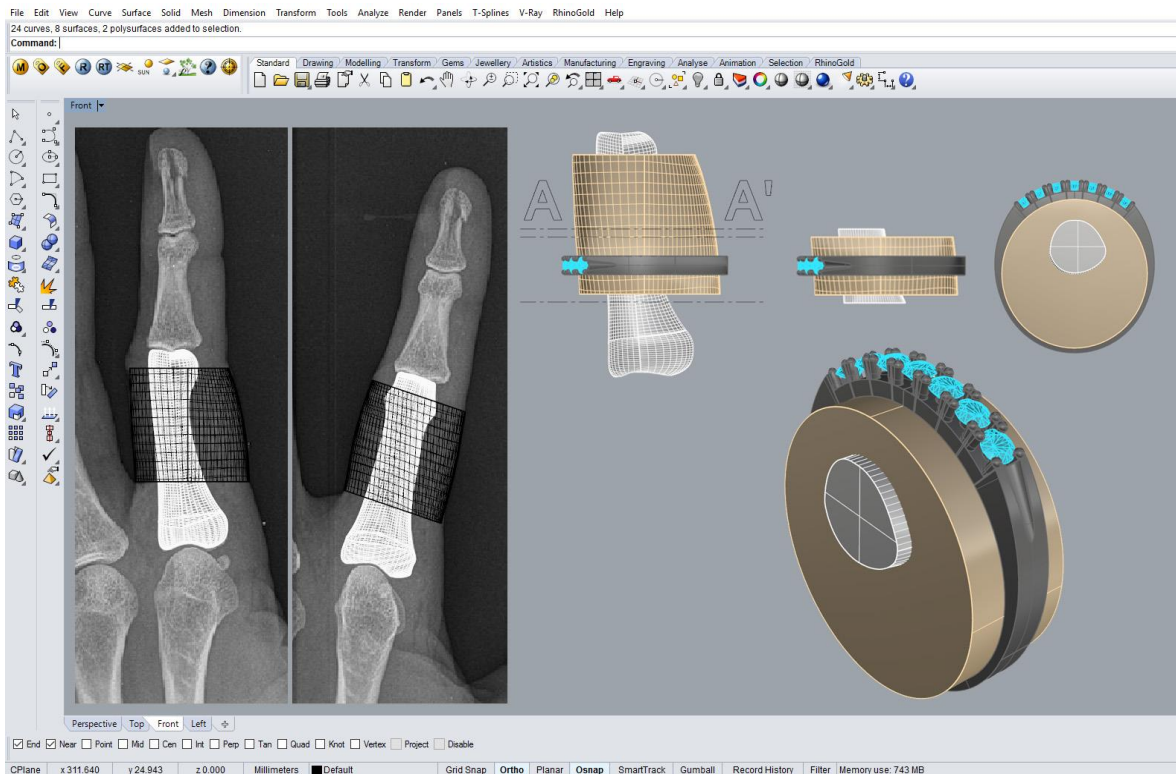
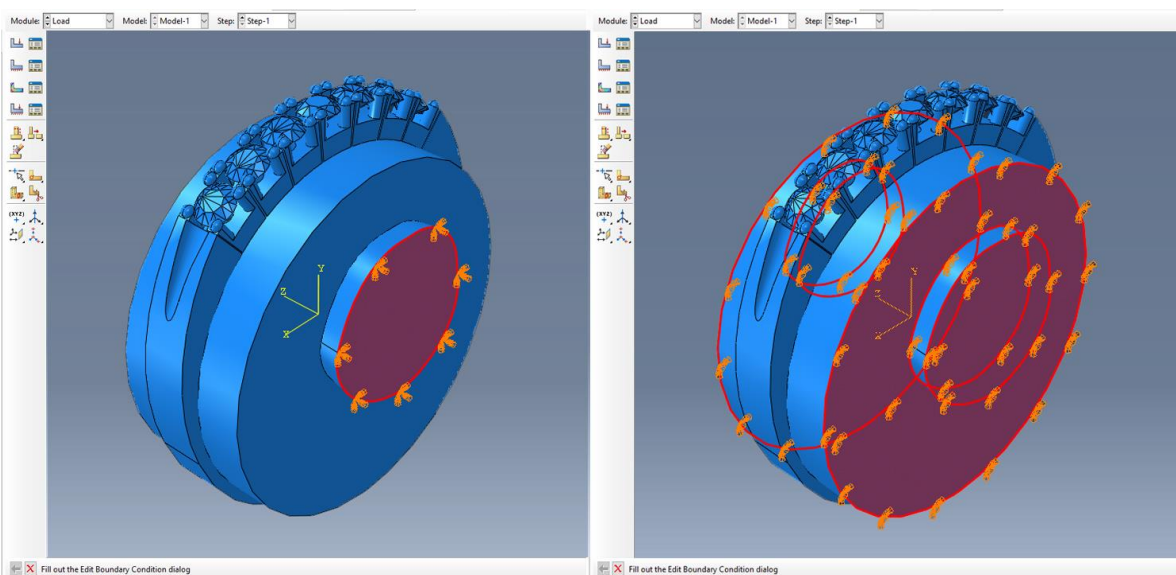


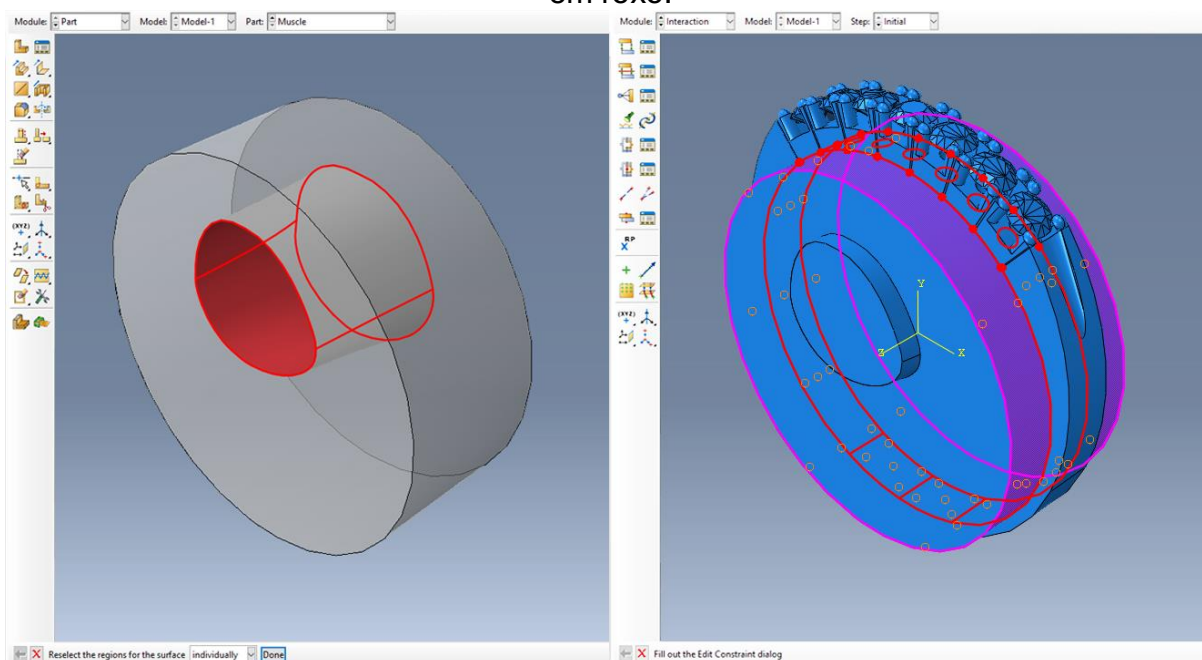
Figura 22 – Condições de suporte aplicadas à estrutura. À esquerda, a face onde foi determinado o engaste e à direita a restrição de movimento no eixo z, aplicada na face anterior e posterior das estruturas osso e músculos/tendões, em vermelho.



4.3. INTERAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS

Com a inserção de novos elementos e refino das análises, houve a reconfiguração e mesmo a adição do passo *interaction* nas análises realizadas pelo software *Abaqus*. Esse passo faz a interação entre os elementos submetidos a análises, ou seja, entre a estrutura do osso e o músculo/tendão, entre o músculo/tendão e o anel e entre o anel e as gemas. Para facilitar o processo em *model database; model; parts*, em cada estrutura, em *surface; create*, são criadas as superfícies que estarão em contato com outra estrutura (Figura 23).

Figura 23 – Configuração de interação entre as estruturas. À esquerda, criando superfície interna da estrutura músculos/tendões para aplicação de contato, em vermelho e à direita definindo a relação *master surface* na superfície interna do anel, em vermelho e a *slave surface* na superfície externa da estrutura músculos/tendões, em roxo.



Na aba *interaction* faz-se uso da opção *create constraint*, selecionando a opção *tie*, a qual cria um vínculo permanente, com aderência perfeita, entre as superfícies em contato. A exemplo, na interação entre músculos/tendões e anel, seleciona-se a superfície externa do primeiro e a superfície interna do segundo, determina-se então a relação entre os pares de contato, definindo uma superfície

como *master surface* e a outra como *slave surface*. Fatores como refino de malha, volume da estrutura e rigidez do material influenciam na escolha. Esse vínculo impede a separação dos pontos da malha definida como *slave surface* em relação a *master surface*. Para as análises tem-se as seguintes relações:

- Osso e músculos/tendões; superfície externa do osso como *master surface*, superfície interna do músculo/tendão como *slave surface*.
- Músculo/tendões e anel; superfície interna do anel como *master surface*, superfície externa do músculo/tendão como *slave surface*.
- Anel e gemas; granitos do anel como *master surface* e superfície externa das gemas como *slave surface*.

4.4. REFINAMENTO DE MALHA

Para determinar o índice adequado para o espaçamento entre os pontos que formam a malha aplicada às estruturas, foi analisado o corpo de prova AM4 no caso C, ou seja, 112,5N distribuída ao longo de um 1/8 da superfície externa do anel, na região da cravação. Esse caso foi aplicado com 3 refinamentos diferentes de malha, 0,6mm, 1,1 e 1,6mm. Vale ressaltar que quanto menor o valor mais próximo estão os pontos que compõem a malha, logo maior o refinamento. Dentre os índices obtidos, a máxima de deslocamento em relação ao refinamento de malha foi utilizada para gerar o Quadro 7.

Quadro 7 – Índices máximos de deslocamentos obtidos, corpo de prova AM4 no caso C, variação do índice de refinamento de malha em 0,6mm, 1,1mm e 1,6mm.

Índice de Refinamento de Malha	Índice Máximo de Deslocamento
0,6 mm	0,42 mm
1,1 mm	0,40 mm
1,6 mm	0,35 mm

O quadro gerado a partir dos resultados mostra que não há grandes discrepâncias entre os índices obtidos. Considerando que a malha mais refinada apresenta um custo computacional muito elevado e, com base nos dados de deslocamento obtidos, é definida a utilização do refinamento 1,1mm como o índice a ser aplicado na análise para todos os corpos de prova. Vale ressaltar que a geometria do anel possui muitos detalhes pequenos, o que faz com que o tamanho dos elementos finitos precisem ser definidos em função desses pontos, ficando estas partes já mais refinadas.

4.4.1 Considerações:

O refinamento do método de análise possibilita a obtenção de resultados mais próximos às diversas situações reais de uso. Tendo em vista que converge para a utilização de: (i) corpos de prova existentes no mercado, indicados em bibliografia; (ii) condições de suporte que consideram o uso do anel em estrutura que simula o dedo humano; (iii) condições de carregamento que abordam diferentes situações de distribuição pela mão, para cada carga simulada; (iv) novo passo no *Abaqus*, o qual traz a interação entre os elementos anel, músculo/tendões e osso; (v) malha adequada para a obtenção de resultados mais precisos.

RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Submetido aos testes, com as condições de contorno refinadas, foram obtidos resultados de tensões em von Mises e deslocamentos em magnitude nas quatro amostras de mercado, duas amostras indicadas por bibliografia e uma amostra que utiliza as dimensões mínimas necessárias para viabilizar sua produção.

5.1. RESULTADOS

As cargas foram aplicadas do seguinte modo:

- Caso A, 45N concentrada sobre os granitos de uma gema, na região da cravação, carga dinâmica;
- Caso B, 14N distribuída ao longo de um 1/8 da superfície externa do anel, na região oposta a cravação, carga estática;
- Caso C, 112,5N distribuída ao longo de um 1/8 da superfície externa do anel, na região da cravação, carga estática;
- Caso D, 112,5N distribuída ao longo de um 1/8 da superfície externa do anel, na região oposta a cravação, carga estática;

As Figuras 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31 foram geradas a partir dos resultados obtidos no *software Abaqus*. Para facilitar a comparação entre as amostras os dados foram agrupados no Quadro 7.

Figura 24 – Análise aplicada em AM1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

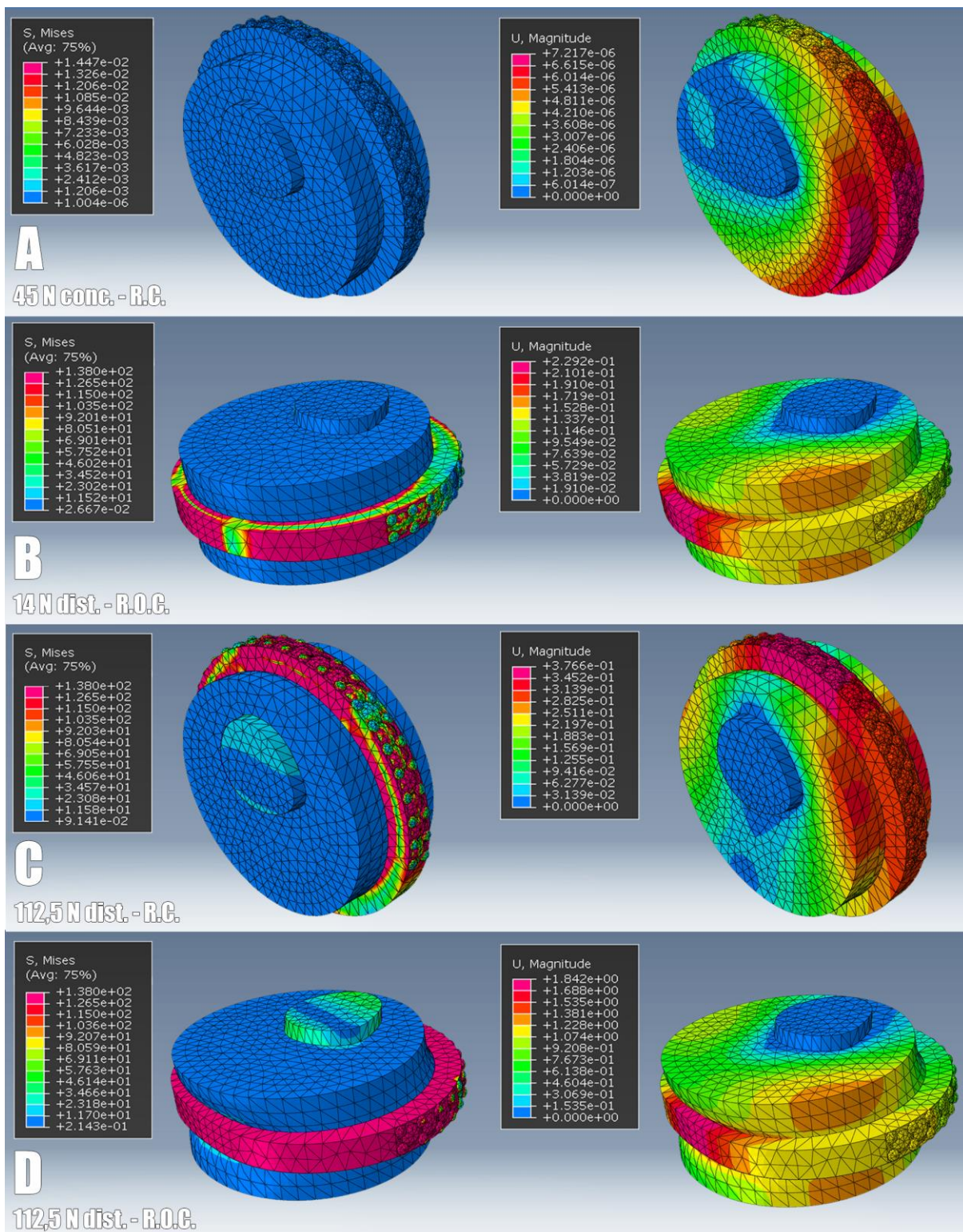


Figura 25 – Análise aplicada em AM2; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

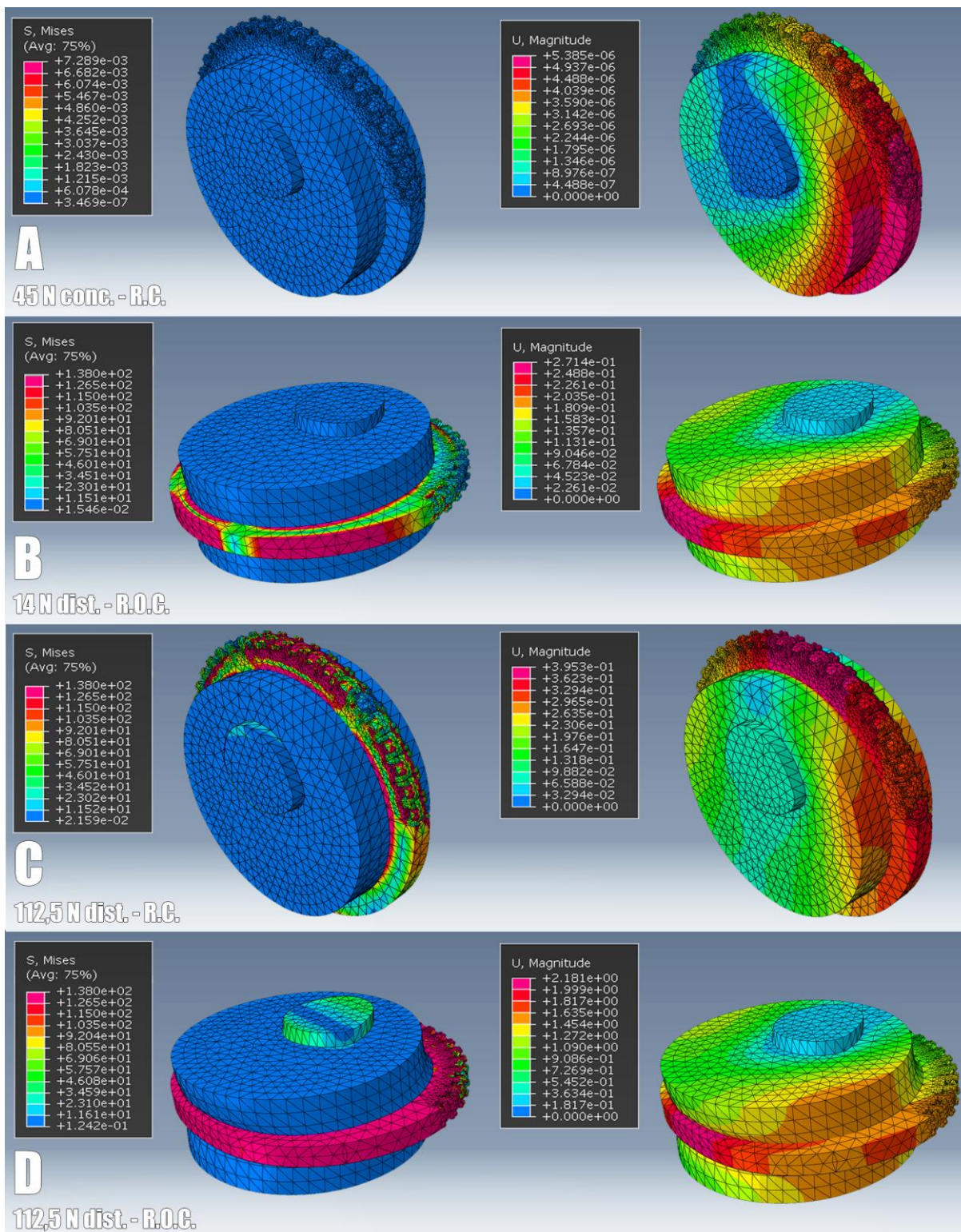


Figura 26 – Análise aplicada em AM3; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

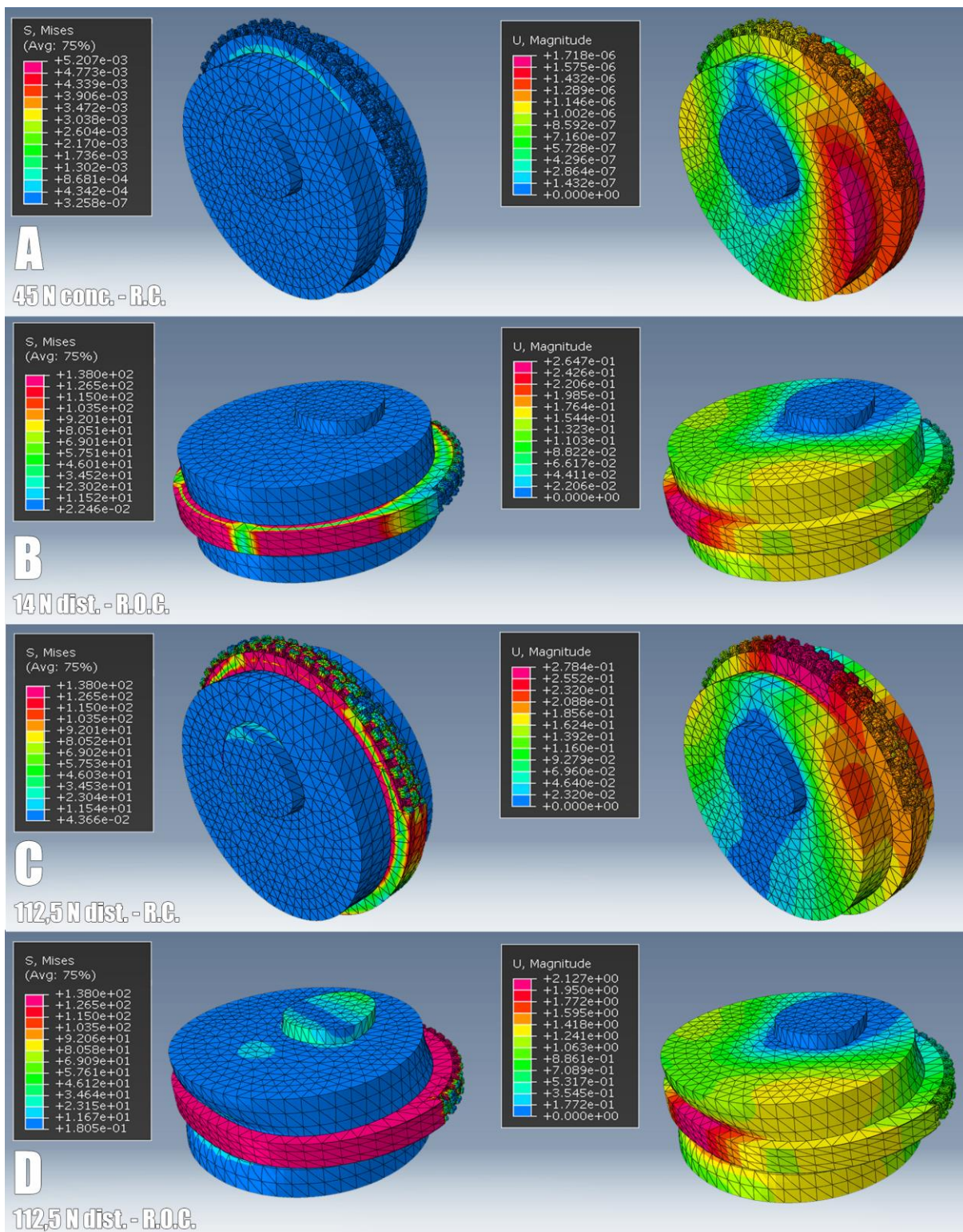


Figura 27 – Análise aplicada em AM4; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

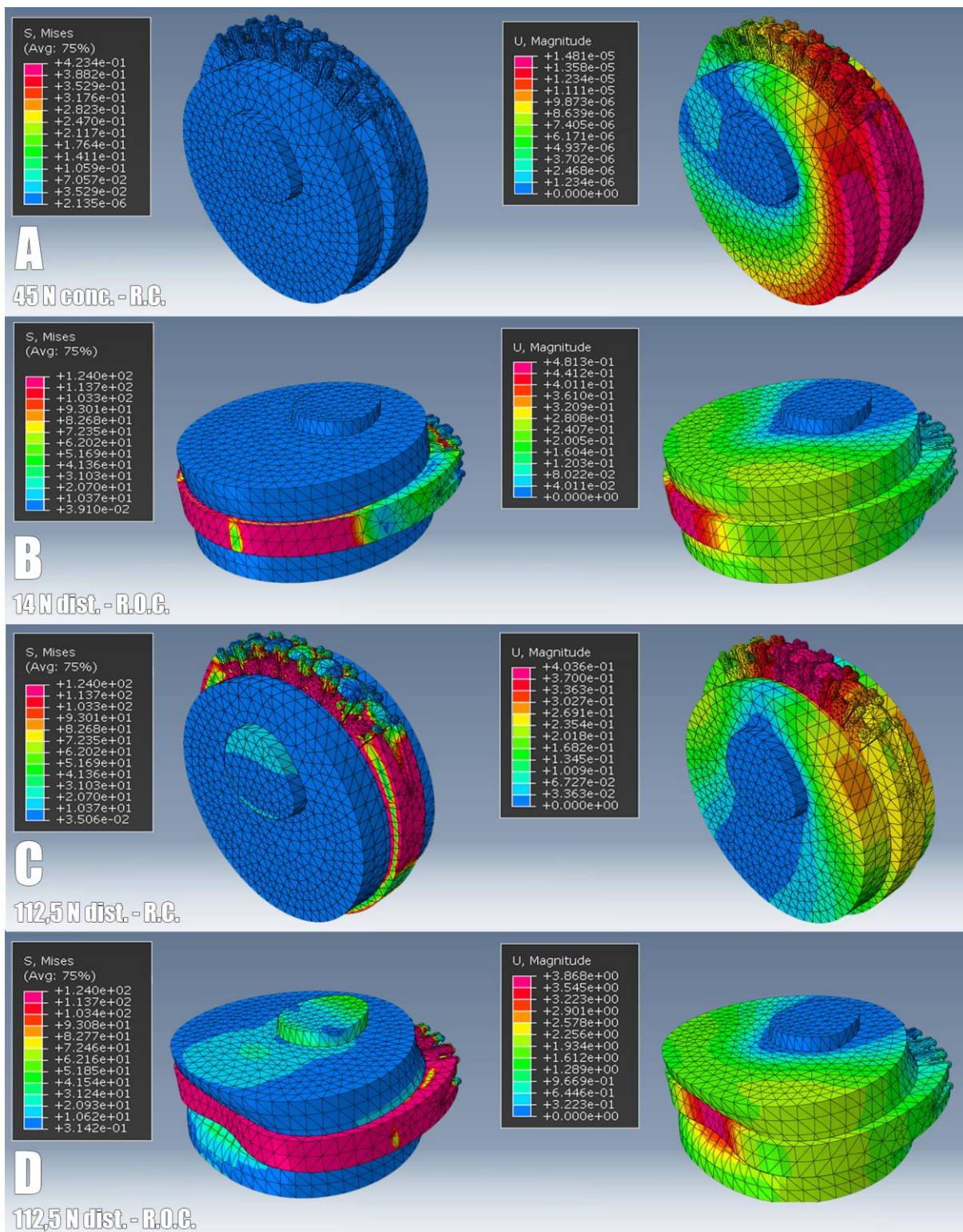


Figura 28 – Análise aplicada em AB1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

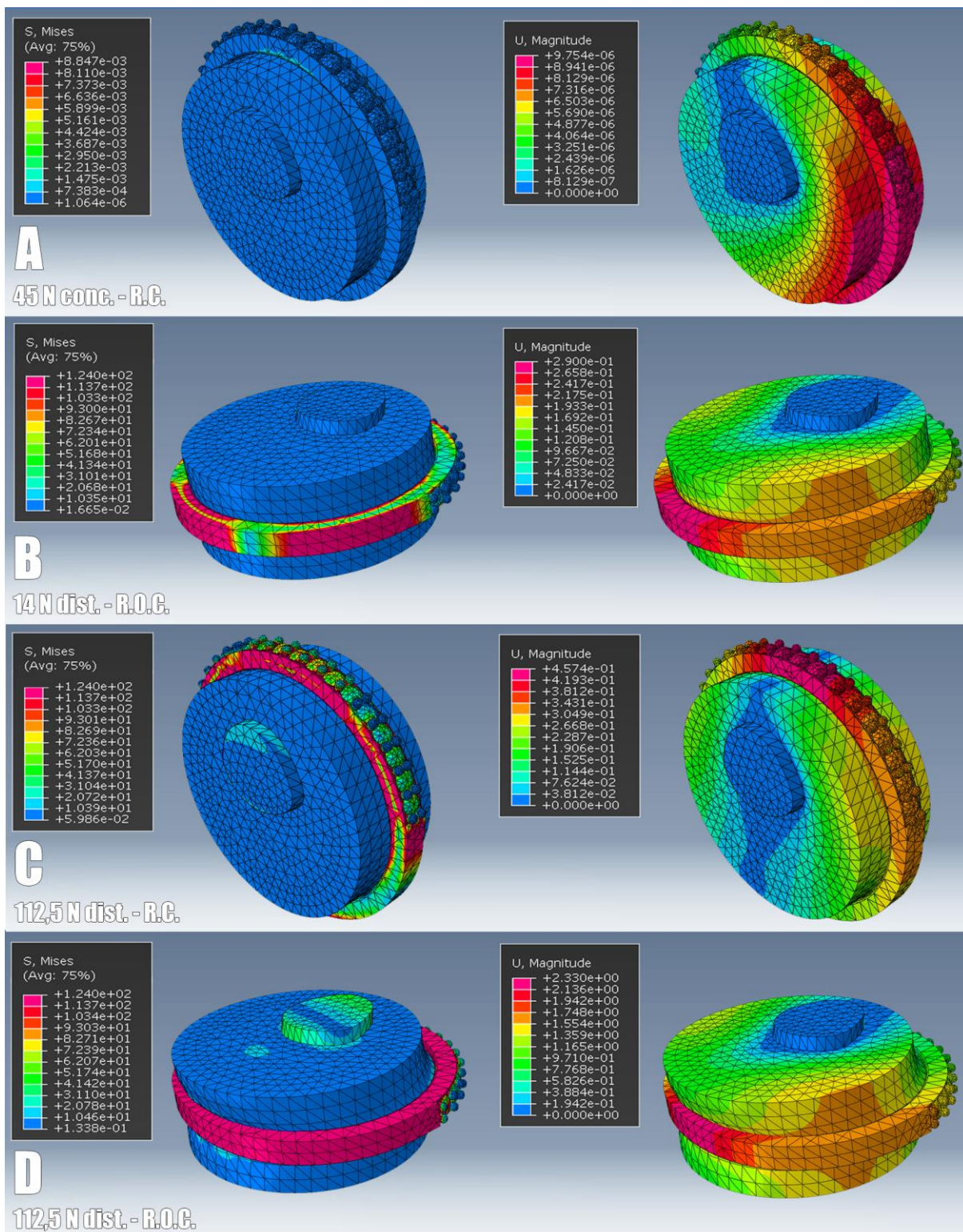


Figura 29 – Análise aplicada em AB2; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

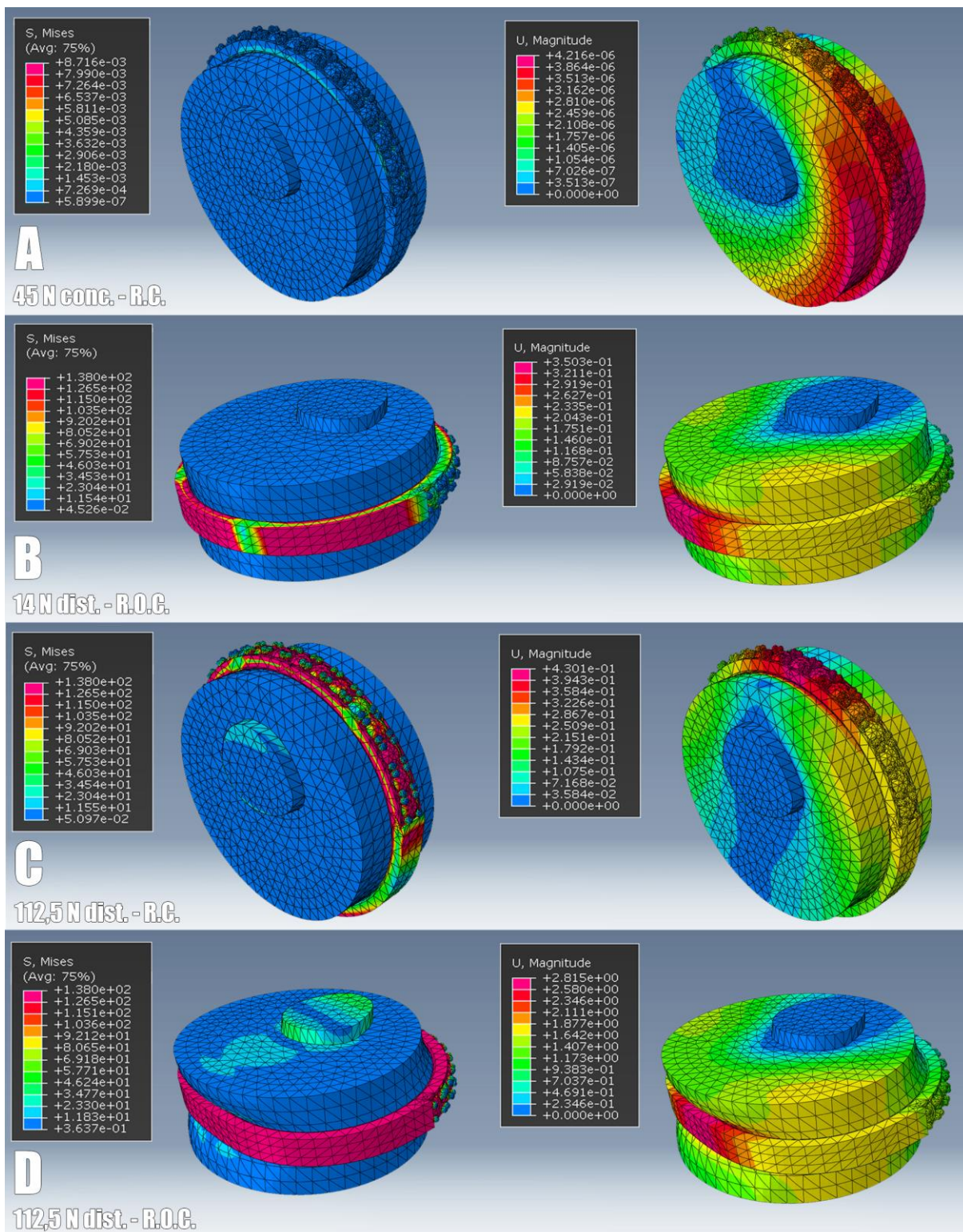
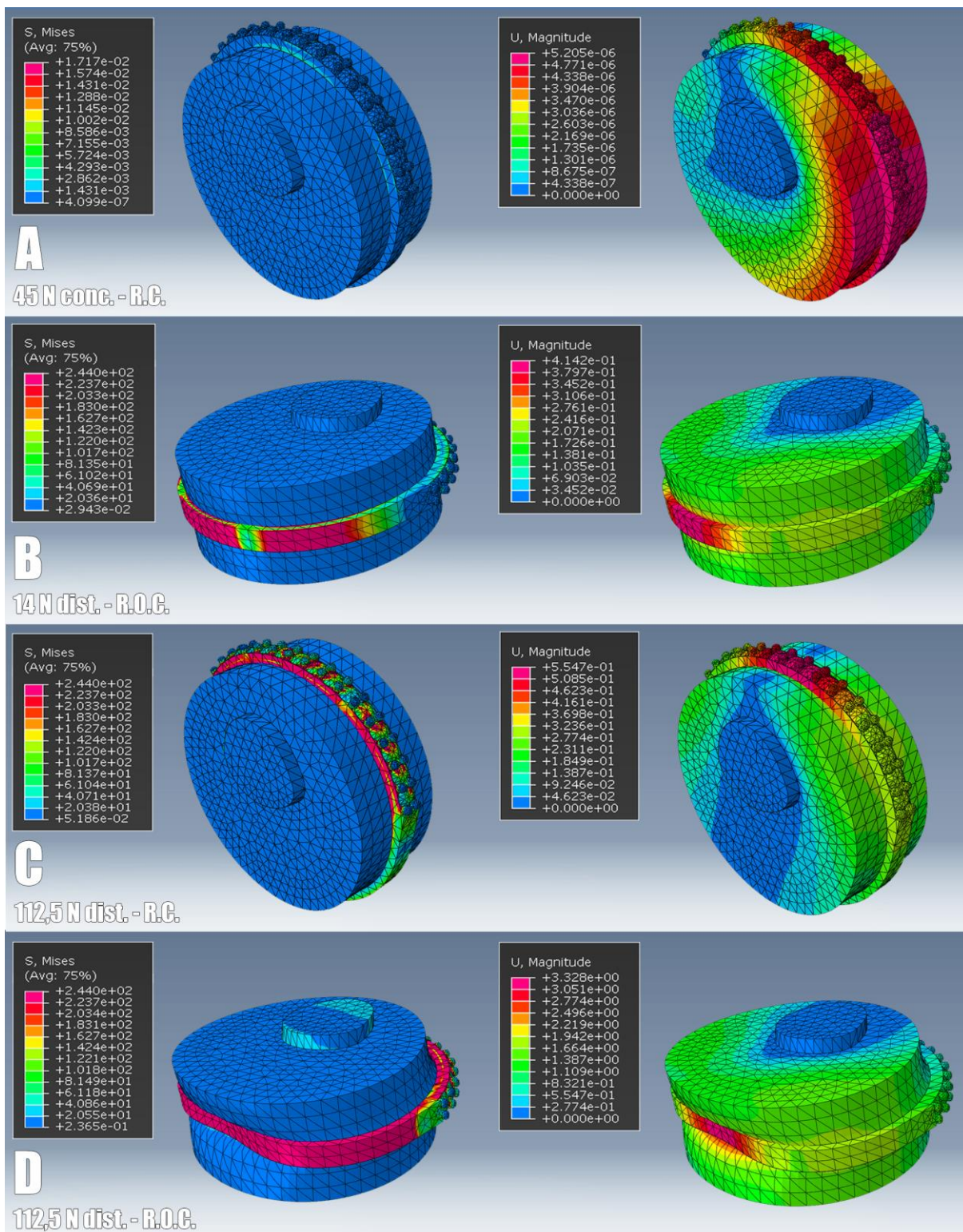


Figura 30 – Análise aplicada em AL1; Corpos de prova à esquerda, predominantemente azuis, mensuram tensões de von Mises (MPa); Corpos de prova à direita, com maior gama de cores, mensuram deslocamentos em magnitude (mm).

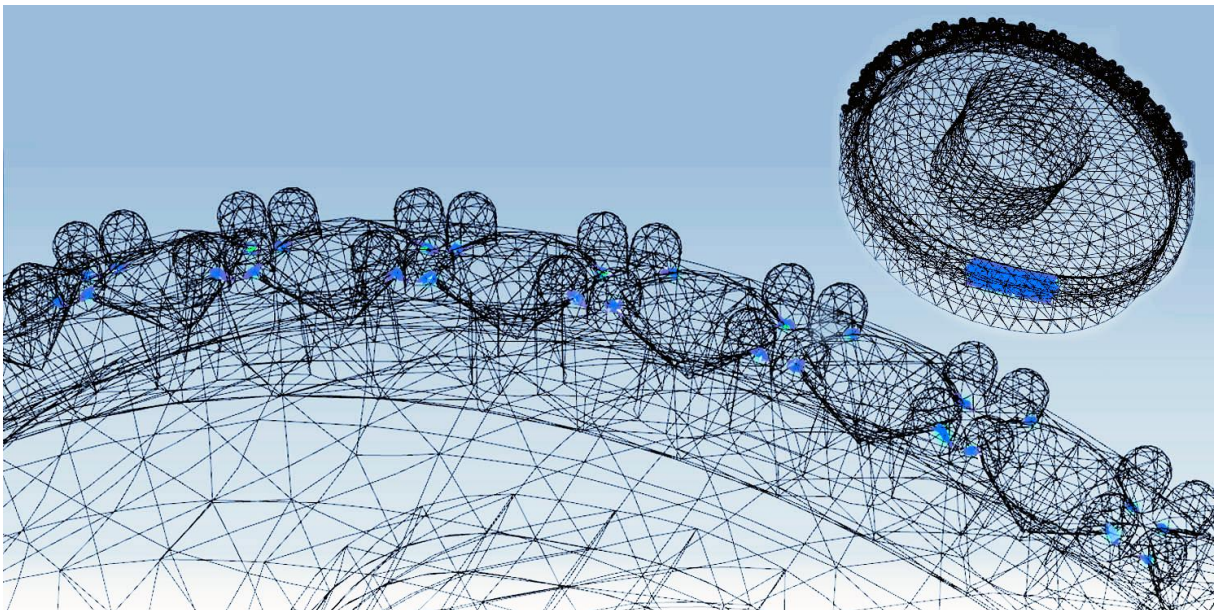


Quadro 8 – Resultados obtidos nas análises geradas pelo *software Abaqus*, índices destacam os máximos valores de tensão.

Corpo de Prova	Caso	Tensão (von Mises)	Deslocamento (Magnitude)	Carregamento
AM1 Figura 26	A	0,01 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	138 MPa, plastifica	0,22 mm, na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	138 MPa, plastifica	0,37 mm, na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	138 MPa, plastifica	1,84 mm, na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AM2 Figura 27	A	0,007 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	138 MPa, plastifica	0,27 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	138 MPa, plastifica	0,39 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	138 MPa, plastifica	2,18 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AM3 Figura 28	A	0,005 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	138 MPa, plastifica	0,26 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	138 MPa, plastifica	0,27 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	138 MPa, plastifica	2,12 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AM4 Figura 29	A	0,4 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	124 MPa, plastifica	0,48 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	124 MPa, plastifica	0,40 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	124 MPa, plastifica	3,86 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AB1 Figura 30	A	0,008 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	124 MPa, plastifica	0,29 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	124 MPa, plastifica	0,45 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	124 MPa, plastifica	2,33 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AB2 Figura 31	A	0,008 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	138 MPa, plastifica	0,35 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	138 MPa, plastifica	0,43 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	138 MPa, plastifica	2,81 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.
AL1 Figura 32	A	0,01 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	244 MPa, plastifica	0,41 mm na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	244 MPa, plastifica	0,55 mm na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	244 MPa, plastifica	3,32 mm na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.

Com os resultados, percebe-se que em todos corpos de prova, para o caso A, a tensão gerada não alcançam limite de escoamento do material, seja latão 80% Cu, 20% Zn folheado a ouro, prata 925 ou ouro 70% Au e 30% Pt. Já para os casos B, C e D a plastificação ocorre em todos os corpos de prova, o que é representado graficamente pelas áreas em vermelho. O fluxo de distribuição da tensão em todos casos e corpos de prova, começa na região da cravação. No caso B e D, o início da tensão atua juntamente na região oposta à cravação, nos corpos de prova AB1, AB2, AL1, nos demais demais a tensão demora um pouco para atingir essa região (Figura 32).

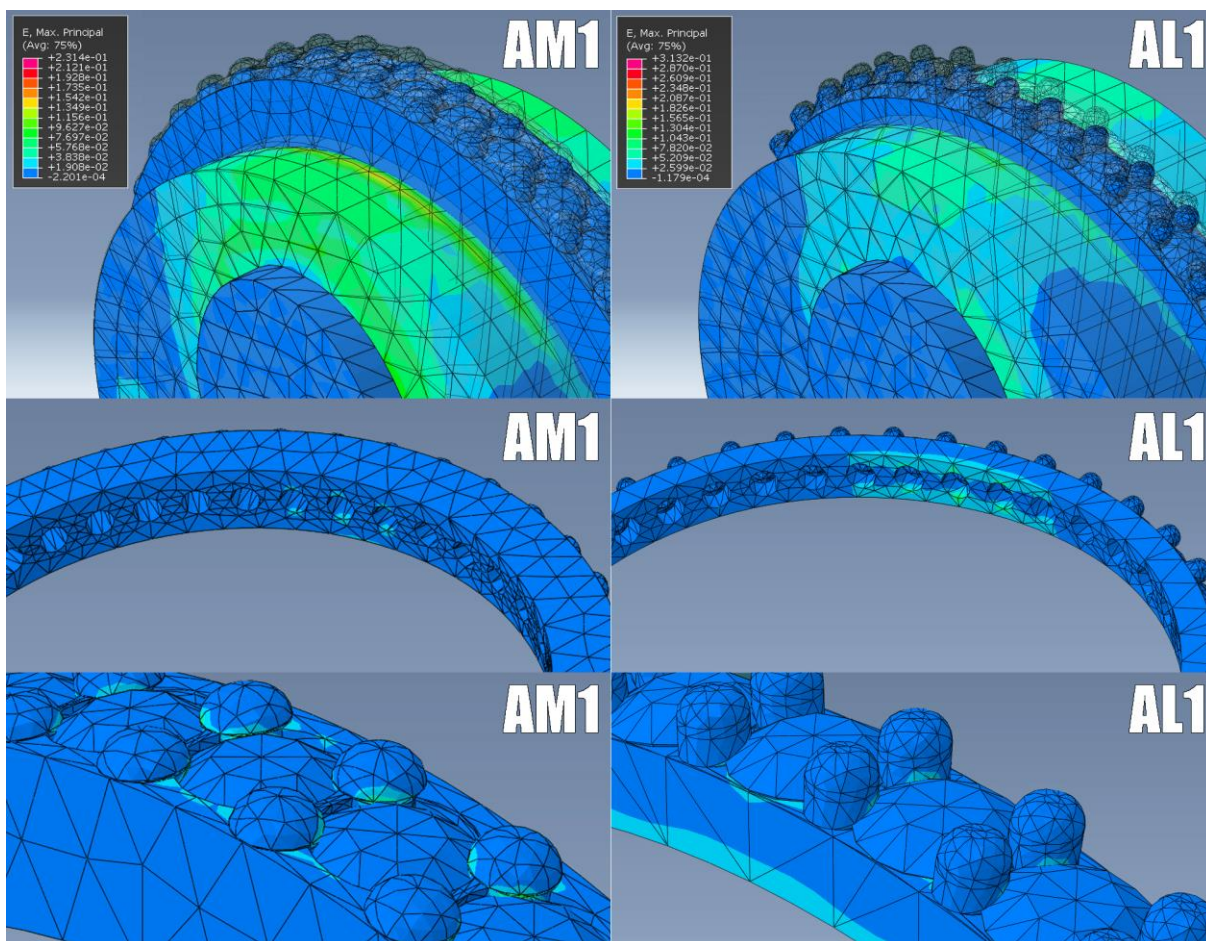
Figura 31 – Fluxo de distribuição da tensão no corpo de prova AB2, caso D. A tensão inicia na região da cravação, em azul e verde, no detalhe abaixo e na região oposta a cravação, em azul, acima



Esse dado corrobora o presuposto que define a região da cravação como crítica, o que faz necessária a análise em loco para entender se esse acúmulo de tensão pode comprometer a estrutura que sustenta as gemas. Para tanto analisam-se os corpos de prova AM1 e AL1: o primeiro com grandes áreas plastificadas na região da cravação e o segundo com o maior índice de deslocamento na mesma

região, equivalente à 0,55 mm, resultados obtidos no caso C. Os índices obtidos na figura 33 mensuram a deformação sofrida nas áreas após a aplicação das cargas.

Figura 32 – Mensuração da deformação em mm, caso C. Em cinza, anel na posição inicial; em cores, posição final do anel após a aplicação da carga.



Destaca-se o comportamento plenamente satisfatório dos corpos de prova, frente às cargas aplicadas na região da cravação. Seja no modo pelo qual estão configuradas, pelo dimensionamento, materiais utilizados, e mesmo pelas condições de contorno aplicadas, as deformações são praticamente nulas. As máximas no anel, situam-se na parte inferior e na cravação com valores de 0,05 mm em AM1 e 0,07 mm em AL1. Pode-se observar que a maior parte das áreas correspondentes à cravação permanecem na cor azul, com os menores índices de deformação, para ambos os corpos de prova. Nota-se a absorção da carga e deformação por parte do sólido correspondente aos tendões e músculos, com

grandes áreas em verde e azul claro, o que contribuí para os baixos índices no anel. Obviamente que se os carregamento fossem aplicados de modo que a resultante de tensões causasse momento fletor sobre os granitos, deformações de 0,12 mm já causariam desprendimento das gemas a exemplo do corpo de prova AM3, o qual possui menor porcentagem de metal do granito sobre a gema. O comportamento sobre esse corpo de prova e demais fabricados pelo processo de estereolitografia é plenamente previsível, já que há precisão extrema entre as medidas. Porém corpos de prova AM1 e AM4, fabricados com ajustes manuais na cravação é difícil de prever o comportamento exato, já que há variação na porção de metal sob a coroa da gema. A exemplo de AM1, foram identificados pontos frágeis com 0,10 mm de metal sob a gema, o qual não corresponde ao mínimo de 10% da medida do diâmetro para gemas menores que 2mm, indicado por Rosseti (2011).

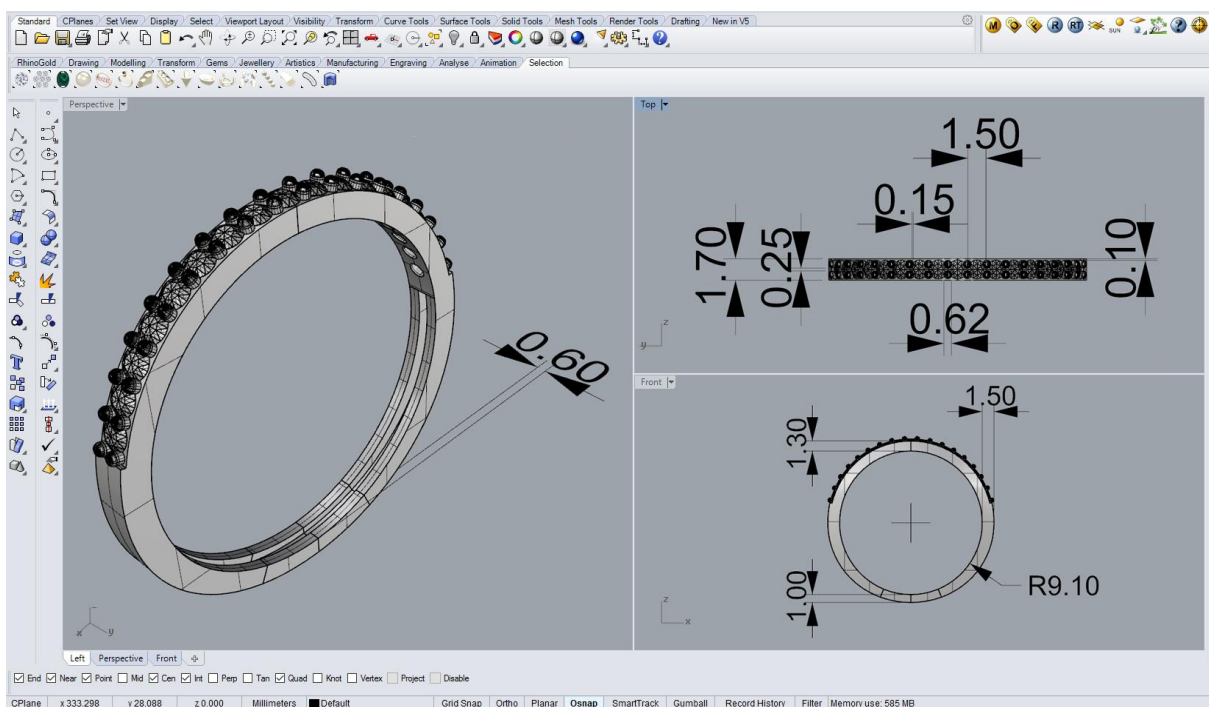
Para as cargas aplicadas ao lado oposto da cravação o maior índice de deslocamento foi obtido no caso D, no corpo de prova AM4, mensurado em 3,86 mm. O menor índice de deslocamento, para o mesmo caso, para a região oposta a cravação foi de 1,84 mm no corpo de prova AM1. Percebe-se que tanto AM4 como AL1, corpos de prova que fazem uso do limite de medida para fundição, 0,6 mm, são os que possuem maior índice de deslocamento, atuando tal ponto como fragilizante para a estrutura. Obviamente que o índice de deslocamento não está estritamente relacionado a dimensões mais robustas e menos robustas. Pois o corpo de prova AM4, o qual possui maior deslocamento possui dimensões mais robustas e o dobro de material de AL1. Esse ponto reforça que fatores como a organização da estrutura, bem como o modo em que a tensão gerada distribui-se pela mesma durante os carregamentos atuam nos resultados.

Analisando os resultados dos quadros 4 e 6, constata-se que os corpos de prova que possuem maior volume tendem a ter um menor deslocamento, sendo o contrário válido. Esse é um ponto chave da pesquisa, pois faz-se necessário buscar um equilíbrio entre a quantidade de material utilizado e a estabilidade da estrutura. Entre todos os corpos de prova ressalta-se AM3 como aquele que possui equilíbrio entre a quantidade de material utilizado e os índices de deslocamento da estrutura.

Buscando refinar ao máximo a estrutura quanto a relação entre o uso de material e a estabilidade foi feito a modelagem de um último corpo de prova, através

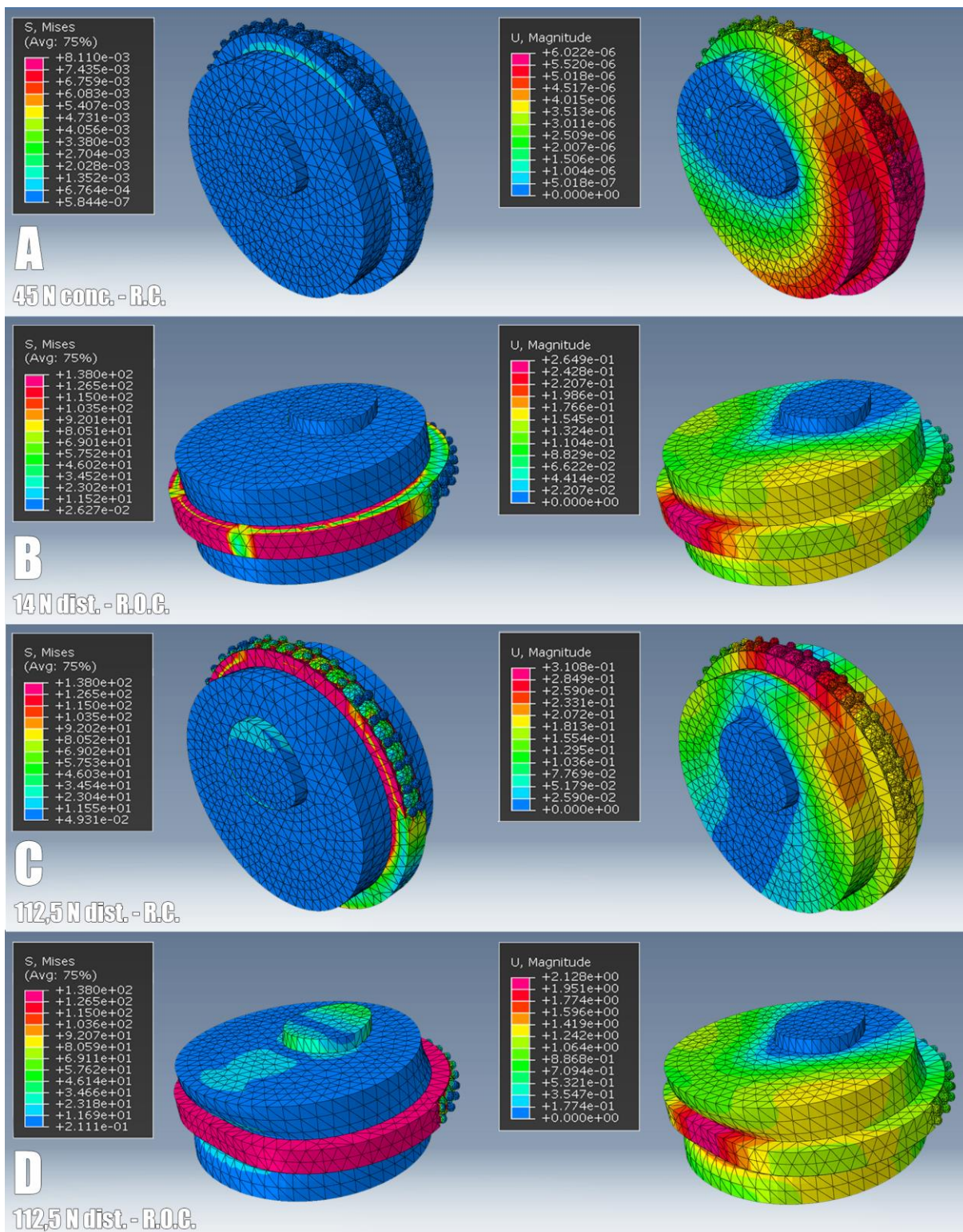
do software *Rhinoceros 3D*. Nomeado amostra indicada, A11, mescla a cravação e largura de AB1, a qual possui os 10% de metal sobre a gema na cravação bem como utiliza gemas de 1,50 mm de diâmetro. Demais dimensionamentos do corpo do anel seguem os especificados em AM3 (Figura 34). Para obter uma maior redução de volume, a estrutura que compõe o anel é feita em paredes de 0,6mm de espessura, trabalhando no limite para a fundição. Como resultado o volume obtido foi mensurado em 115 mm³.

Figura 33 – Modelagem digital, no software *Rhinoceros 3D*, amostra A11.



Finda a modelagem do corpo de prova A11, foram aplicadas as mesmas análises já configuradas no software *Abaqus* (Figura 35), como material utiliza-se o latão 80% Cu, 20% Zn folheado a ouro. Os resultados obtidos foram compilados no Quadro 8.

Figura 34 – Análise aplicada em AI1; Anéis predominantemente azuis mensuram tensões de von Mises (MPa); Anéis com maior gama de cores mensuram deslocamentos em magnitude (mm).



Quadro 9 – Resultados obtidos nas simulações. Os índices destacam os máximos valores de tensão e deformação.

Corpo de Prova	Caso	Tensão (von Mises)	Deslocamento (Magnitude)	Carregamento
AM1 Figura 26	A	0,008 MPa, não plastifica	0,00 mm	45N concentrado, na R.C.
	B	138 MPa, plastifica	0,26 mm, na R.O.C.	14N distribuída, na R.O.C.
	C	138 MPa, plastifica	0,31 mm, na R.C.	112,5N distribuída, na R.C.
	D	138 MPa, plastifica	2,12 mm, na R.O.C.	112,5N distribuída, na R.O.C.

Os índices obtidos para o corpo de prova A11 foram bastante satisfatórios, agrupando os aspectos positivos dos corpos de prova AM3 e a cravação de AB1. O índices de tensão gerados no caso A não plastificam a estrutura, enquanto que em B, C e D há a plastificação. Nesse ponto o comportamento é bastante similar aos demais corpos de prova. Porém os índices de deslocamento nos casos B, C e D situam-se dentre os mais baixos identificados. No caso B e D somente os índices de AM1 são inferiores em 16% para ambos os casos, porém o volume de AM1 é 28% maior que A11. No caso C apenas o índice de AM3 é inferior, em 13%, porém o volume de AM3 é 10% maior, ressalta-se que esse último faz uso de uma gema 17% menor, ou seja, necessitaria menos material para estruturar a peça. Destaca-se a redução de massa do corpo de prova, o qual agrupa as melhores características de AB1 e AM3, porém com volume 28% menor que o primeiro e 10% menor que o segundo. Esse índice o coloca como o terceiro corpo de prova com menor volume, atrás de AL1 e AB2, os quais possuem fragilidades estruturais anteriormente citadas.

O corpo de prova indicado pela pesquisa não é uma verdade absoluta, pois priorizam-se variáveis em detrimento de outras. O diferencial que o estudo busca é ser uma ferramenta que proporciona dados sobre cada projeto a ser desenvolvido. Cabe às empresas utilizá-los direcionando e selecionando os índices conforme a necessidade, especificação, nicho de mercado que cada projeto visa atender.

5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa une conhecimentos das áreas de engenharia e design, mesclando conceitos de engenharia estrutural ao design de joias. Essa abordagem resulta em um método que traz a linguagem dos elementos finitos para a realidade do designer de um modo simples e versátil para ser aplicado na avaliação das joias em processos de pré-fabricação. Essa contribuição prepara o designer, profissional responsável pelo processo de criação de novas joias, com conhecimentos e aplicações ainda inexplorados no ramo. Amplia a visão e compreensão do mesmo para com o objeto joia, trazendo a percepção analítica estrutural para ponderar e auxiliar no desenvolvimento de novos projetos.

A compreensão dos principais processos atuais de fabricação de joias possibilita o entendimento das limitações e parâmetros em que estão atrelados aos dimensionamentos e configurações utilizadas nas joias. Essas variáveis são imprescindíveis para o entendimento dos resultados, norteando os pontos onde cada projeto pode ou não ser reconfigurado, otimizado. De uma forma macro, contribui para entender o rumo que o setor de produção de joias caminha. Onde apesar do empirismo estar presente é cada vez mais frequente o uso das ferramentas virtuais para projetar, simular e identificar erros. Maior exemplo a essas mudanças é a diminuição do profissional ourives dentro das fábricas em contraponto o aumento no número de modelistas com domínio principalmente no uso do *software Rhinoceros 3D*.

As simulações das principais situações de uso conferiram uma visão analítica sobre como podem afetar as joias. Podem ser identificados quais as variáveis em questão, tais como carga aplicada para cada caso, bem como de que modo a condição de suporte atuam, reduzindo ou intensificando tensões, deslocamentos e deformações. Entende-se quais os casos mais críticos para cada joia e mesmo aqueles que não proporcionam danos perceptíveis. Em uma abordagem ampla as simulações contribuem para o entendimento no qual as joias passam a ser inseridas em um contexto de uso que exploram questões além da ergonomia.

A identificação dos principais materiais utilizados na confecção de joias e suas reservas mundiais reforça a importância do uso consciente. Os dados levantados corroboram a importância da aplicação da análise estrutural por elementos finitos como método que auxilia no uso otimizado de material para cada projeto. A percepção que grande parte do nicho joalheiro está conectado com a efemeridade do mercado da moda faz com que simular para otimizar seja vital. Esse entendimento é importante para tornar menos impactante o consumo desse bem como para o empreendedor ter um processo produtivo mais eficaz e assertivo.

Os resultados obtidos comprovam a importância da análise estrutural no projeto de joias. O método sistematiza e conseqüente facilita o processo de estruturar e quantificar adequadamente o uso dos metais necessários para a fabricação de joias. Adaptando-o para cada joia a ser desenvolvida, auxilia no desenvolvimento de cada projeto sem que o mesmo tenha sido produzido fisicamente, trazendo acuracidade na utilização dos materiais, técnicas e energia despendidos ao longo da cadeia produtiva que cada projeto consome. Com o método as indústrias têm acesso aos índices de tensão, de deslocamento e de massa para cada projeto, podendo definir qual a prioridade entre essas três variáveis, para cada nova joia a ser produzida. Prioridades que passam a ser definidas por um método preciso e não apenas baseado por conhecimentos empíricos, que até então predomina no setor.

Para a continuidade da pesquisa, como possibilidades a futuros estudos, segere-se analisar como implementar o método no meio industrial joalheiro. Também poderiam ser submetidas as análises demais joias, a exemplo de um brinco, pingente, pulseira, entre outras, onde a dinâmica das condições de carregamento e suporte seriam diferentes. Ressalta-se que o estudo poderia servir como base para uma implementação normativa acerca de índices que classificariam o produto quanto a otimização do material utilizado ou mesmo para suprir a determinados índices de tolerância de estabilidade estrutural. Esses índices seriam repassados ao consumidor, para que o mesmo tenha conhecimento de quais padrões de qualidade e uso de materiais o produto a ser adquirido atende.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A CRAVAÇÃO de Gemas e suas Modalidades. Revista Diamond News. Ano 11, n. 34, p. 43-47, 2010.

ALZAMORA, P. **Curso de Tecnologia de Materiais.** Istituto Europeo di Design. São Paulo, 2005. 33p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16058:** informações e documentos: joias: tamanhos de anéis: classificação. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

AWRUCH, A. M.; MORSCH, I. B. **Teoria da Elasticidade Aplicada à Mecânica Estrutural.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 297 p.

BARBOSA, A.; SOUZA, J. **Contaminação por Mercúrio e o Caso da Amazônia** Química Nova na Escola. n. 12, p. 3-7, 2000.

BONSIEPE, G. KELLNER, P. POESSNECKER, H. **Metodologia experimental: desenho industrial.** Brasília: CNPq/Coordenação Editorial, 1984. 86 p.

BRESCIANI, F. E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação Plástica dos Metais.** 1. ed. Dig. São Paulo: EPUSP, 2011. 254 p.

BRITO, C. **Da Lama ao Caos, do Caos à Lama.** Disponível em: <https://zerohora.atavist.com/mariana> Acesso: 02 fev. 2016

CADOGAN, M. **Radiology Image Database.** Disponível em: <http://lifeinthefastlane.com/table/radiology-database/> Acesso: 25 jul. 2016.

CAHETÉ, F. **A Extração do Ouro na Amazônia e Implicações para o Meio Ambiente.** Novos Cadernos NAEA. v. 1, n. 2, 1998.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.

CAMPANARI, F. A. **Teoria das Estruturas.** 1. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1985. 432 p.

CORBETTA, G. **Joalheria de Arte.** Porto Alegre: AGE, 2007. 143 p.

COTAÇÃO DO OURO. **Histórico da Cotação do Ouro.** Disponível em: <http://www.xn--cotaodoouro-c8a5c.com/cotacao-ouro-historico/> Acesso: 16 fev. 2016.

COWIN, S. C. **Bone Mechanics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press Inc., 1989. 313 p.

CREBI. **Mercado Brasileiro de Joias 2014**. Disponível em: <http://www.crebi.com/materia/brazilian_market_jewelry_2014.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

DE SÁLES, J.; NETO, J; MALITE, M; DIAS, A. **Sistemas Estruturais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2015. 232 p.

DNPM. **Prata**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/prata-sumario-mineral-2014> Acesso: 20 abr. 2015.

DÜRRWACHTER, E; MERL, W. **Silver & Silver Alloys**. Disponível em: http://www.doduco.net/media/34482/silver_silver_alloys__englisch_24-10-2011.pdf Acesso: 28 set. 2015.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A Materialização da Ideia: Noções de Materiais para Design de Produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 199 p.

FONSECA, J. **A prototipagem rápida como proposta para solução de problemas técnicos na produção de joias no Rio de Janeiro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2006. 105 p.

FONTES, F. **Análise Estrutural de Elementos Lineares Segundo a NBR 6118:2003**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 120 p.

GERE, J. **Mechanics of Materials**. 6. ed. Belmont: Brooks/Cole – Thomson Learning, 2004. 940p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184 p.

GIULIANO, J. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 136 p.

GRADY, D. E. **Impact Strength and Indentation Hardness of High-Strength Ceramics**. In: High-Pressure Science and Technology, 1993. (eds. S.C. Schmidt, J. W. Shaner, G. A. Samara and M. Ross) American Institute of Physics, New York, p. 741-744, 1994.

GUILGEN, C. A.; FERRO, S. G. **Design de Joias: Cerâmica Avançada e a Prototipagem Rápida na Joalheria**. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial. Especial Design, p. 141-156, 2015.

HALL, S. **Basic Biomechanics**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 538 p.

HASHEMI J.; CHANDRASHENKAR, N.; SLAUTERBECK, J. **The Mechanical Properties of the Human Patellar Tendon are Correlated to its Mass Density and are Independent of Sex.** Clin Biomech (Bristol, Avon) 20: 645-652, 2005.

HERZOG, W. **Skeletal Muscle Mechanics: From Mechanisms to Function.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000. 554 p.

HIBBELER, R. C. **Structural Analysis.** 8. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2012. 695p.

IBGE. **Pesquisa de Orçamento Familiares 2008-2009:** Antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2008_2009_e_ncaa/comentario.pdf Acesso: 19 out. 2015.

IBGM. **O Setor em Grandes Números:** Situação Atual e Perspectivas do Mercado Interno e Externo. Disponível em: http://novo.infojoia.com.br/uploads/arquivos/file/35f70-285-OSetoremGrandesNumeros2012_Completo.pdf. Acesso em: 03 set. 2015.

IBGM/SEBRAE. **Pesquisa da Indústria:** Outubro 2013. Disponível em: <http://novo.infojoia.com.br/uploads/arquivos/file/8abde-IBGM-Pesquisa-ind--stria---2013cor.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

KOPELIOVICH, D. **Materials Engineering:** Gold-platinum Alloy. Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=gold_alloys Acesso: 15 abr. 2015.

KOPELIOVICH, D. **Materials Engineering:** Sterling Silver. Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=sterling_silver Acesso: 15 abr. 2015.

KOPELIOVICH, D. **Materials Engineering:** Wrought copper alloy C24000. Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought_copper_alloy_c24000_low_brass Acesso: 06 jan. 2016.

KÖSTE, W; FRANZ H. **“Poisson’s Ratio for Metals and Alloys,”** Metallurgical Reviews. v. 6, n. 21, 1961, p. 1-56.

LAHNDT, Leslie. **TQM tools for the construction industry.** Engineering Management Journal. Rolla, v. 11, n. 2, p. 23-27, 1999.

LANA, H. **Análise do processo de fundição de peças de joalheria assistida por software CAD/CAM.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Redemat, Belo Horizonte, 2010. 61 p.

LEET, K. M.; UANG C.; GILBERT, A. **Fundamentos da Análise Estrutural.** 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2009. 790 p.

LIEBER, R. **Skeletal Muscle Structure, Function & Plasticity: The Physiological Basis of Rehabilitation**. 2. ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2002. 369 p.

MARTHA, Luiz F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2010. v. 1. 524 p.

OTTOSEN, N.; RISTINMAA M.; **The Mechanics of Constitutive Modeling**. 1. ed. Kidlington: Elsevier Ltd., 2005. 737 p.

PAL, S. **Design of Artificial Human Joints & Organs**. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2014. 419 p.

PASCHOARELLI, L.; MENIN, M.; SILVA, D.; CAMPOS, L.; SILVA J.; **Antropometria da Mão Humana: Influência do Gênero no Design Ergonômico de Instrumentos Manuais**. Ação Ergonômica Revista Brasileira de Ergonomia. v. 5, n. 2, p. 1-8, 2010.

PAVANATI, H. **Introdução à Tecnologia dos Materiais**. Florianópolis: Técnico de Mecânica Industrial – Instituto Federal de Santa Catarina 2010. 164 p. Apostila.

PINILLOS, M.; GAVRILEKO, E. **Curso Básico de Gemologia On-line**. Disponível em: http://www.ige.org/archivos/gemologia/curso-basico-gemologia-online_instituto-gemologico-espanol.pdf Acesso: 25 jul. 2015.

POHLMANN, M. **Contribuição ao estudo de materiais, processos e modelos utilizados na fabricação de joias em larga escala**. 2012. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 100 p.

POMPEI, M. **Técnica & Arte: Modelagem em Cera**. Revista BR&J. p. 52, 2005.

ROCHA, V.; RUBIO, J.; ROMEIRO FILHO, E. **Aplicações CAD/CAM para integração entre projeto e produção na indústria de joias: um estudo de caso em Minas Gerais**. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul.

ROSETTI, E. **Desenhando Joias com Rhinoceros**. 1. ed. São Paulo: Editora Leon, 2011.

SALEM, C. **Joias: modelagem em cera**. 1. ed. São Paulo: Múltiplos Editora, 2002. 168 p.

SANTOS, R. **Joias: fundamentos, processos e técnicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Senac Nacional, 2013. 296 p.

SARTORI, E.; BATISTA, E.; FILHO, O. **Escurecimento e Limpeza de Objetos de Prata**. Revista Química Nova na Escola. n. 30, p. 61-65, 2008.

SMITH, D.; FICKETT, F. **Low-Temperature Properties of Silver**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 100, p. 119-171, 1995.

SORIANO, H. L. **Estática das Estruturas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2010. 402 p.

SORINO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 2003. 580 p.

SOUZA, O. M.; GOMES, R. W. F.; PEREIRA MELO, J. J. **Da Manufatura à Maquinaria Moderna: A Subsunção Real do Trabalho ao Capital**. Revista Labor, v. 7; p. 65-78, 2012

SOUZA, P. **Impacto Econômico da Questão Ambiental no Processo Decisório do Investimento em Mineração**. 1999. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1999. 268 p.

SPYROU, L. A.; ARAVAS, N. **Muscle and Tendon Tissues: Constructive Modeling and Computational Issues**. Journal of Applied Mechanics. ASME, v. 78, 2011.

THORNTON, J. **The Case for CAD/CAM**. AJM, v. 43, n. 1, p 62-65, 1998.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1983. v. 1. 256 p.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da Elasticidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. 545 p.

USGS. **Mineral Commodity Summaries**. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> Acesso: 24 mai. 2015.

WANDERLEY, L. **Geografia do Ouro na Amazônia Brasileira: uma Análise a Partir da Porção Meridional**. 2015. 302 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Paulo, 2015.

WONG K.; HERNANDEZ A. **A Review of Additive Manufacturing**. ISRN Mechanical Engineering, v. 2012, p. 1-10, 2012.

YAMASHITA, I; KUDO, M; TSUKUMA, K. **Development of Highly Transparent Zirconia Ceramics**. TOSOH Research & Technology Review. v. 56, p. 11-16, 2012.