

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE LESÕES EM PASSAGEIROS DE AVIÕES EM
COLISÃO COM O SOLO CONSIDERANDO-SE ACELERAÇÕES VERTICAL E HORIZONTAL

por

Fábio Matiello

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE LESÕES EM PASSAGEIROS DE AVIÕES EM COLISÃO COM O SOLO CONSIDERANDO-SE ACELERAÇÕES VERTICAL E HORIZONTAL

por

Fábio Matiello

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica Dos Sólidos

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 04, Dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e à minha família por todo o apoio e estímulo;
À minha namorada, Amália, por toda ajuda e incentivo;
Ao meu orientador, Prof. Rogério José Marczak, e ao meu co-orientador, Prof. Tales de Vargas Lisboa, pela assistência no desenvolvimento deste trabalho.

MATIELLO, F. **Avaliação da Probabilidade de Lesões em Passageiros de Aviões em Colisão com o Solo Considerando-se Acelerações Vertical e Horizontal**. 2017. 23 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Companhias aéreas têm incrementado seus lucros através da maximização da lotação das aeronaves. Isso tem se evidenciado com a progressiva redução da distância entre poltronas de voos comerciais nas últimas décadas. Este trabalho analisa, com o auxílio de métodos numéricos, como a distância entre poltronas se reflete na segurança do passageiro, através de simulações dinâmicas e comparações de diferentes configurações. O manequim é posicionado sentado sobre uma poltrona e preso em um cinto de segurança de dois pontos. Outra poltrona, com uma rótula plástica implementada na união entre assento e encosto, é posicionada à sua frente. O objetivo é aproximar o modelo do que usualmente ocorre em um pouso forçado, durante a colisão da cabeça do passageiro com o encosto da poltrona à frente. O modelo foi submetido a acelerações longitudinais e verticais estipuladas no regulamento para certificações de poltronas em aeronaves. Ferimentos na cabeça foram analisados com um critério de lesões para a cabeça (HIC – *Head Injury Criterion*) e uma escala de severidade de ferimentos na cabeça (AIS – *Abbreviated Injury Scale*). Ferimentos no pescoço são classificados em graves (AIS 3, 4, 5 ou 6) ou não-graves (AIS 0, 1 ou 2) de acordo com limites toleráveis de forças normais e cisalhantes, além de momentos fletores. Concluiu-se que o risco de vida aumenta conforme a distância entre poltronas cresce – embora poltronas muito próximas também possam representar risco de vida.

PALAVRAS-CHAVE: Probabilidade de lesões, segurança de passageiros, segurança de aeronaves, distância entre poltronas, simulação dinâmica.

MATIELLO, F. **Assessment of injuries probability in aircraft passengers during crash landing considering vertical and longitudinal accelerations**. 2017. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Airliners have been incrementing their profit by maximizing aircraft passenger occupation. This is evident by the progressive decrease in the pitch (distance between seats) in commercial aircrafts during the last decades. This work analyses, using numerical methods, how the pitch value is reflected in the passenger safety, by using dynamic simulations of different configurations. A test dummy is simulated in seated position with fastened seatbelt. Another seat containing a plastic joint is used ahead of the dummy. The use of a seat structure able to deform plastically along with horizontal and vertical imposed accelerations brings the proposed analysis closer to the crash landing condition than most previous studies. Head injuries were analyzed through HIC – Head Injury Criterion and AIS – Abbreviated Injury Scale criteria. Neck injuries were categorized in serious (AIS 3, 4, 5 or 6) and non-serious (AIS 0, 1 or 2) according to maximum loads. The results show that the life risk increases proportionally to the pitch, although exceptionally close seats can also represent life risk.

KEYWORDS: Injuries severity, passengers' safety, aircraft safety, seat pitch, dynamic simulations.

ÍNDICE

| | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 2.1. Análise Transiente Explícita | 1 |
| 2.2. Modelo Bi-Linear Elastoplástico | 2 |
| 2.3. Trabalhos Relacionados | 2 |
| 2.4. Critérios de Lesões..... | 3 |
| 3. METODOLOGIA..... | 5 |
| 3.1. Condições De Pouso | 5 |
| 3.2. Distância Entre Poltronas | 6 |
| 3.3. Poltronas..... | 6 |
| 3.4. Manequim | 8 |
| 3.5. Análise Numérica..... | 9 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 9 |
| 4.1. Lesões na Cabeça..... | 10 |
| 4.2. Lesões no Pescoço | 11 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 13 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 14 |
| ANEXO A | 16 |
| APÊNDICE A..... | 17 |

1. INTRODUÇÃO

A literatura mostra que o transporte aéreo é um dos mais seguros do mundo, em que a chance de morrer em um único voo é de 1 em 29,4 milhões. Porém, alguns fatores como a elevada velocidade de operação fazem com que os acidentes possuam grande potencial para causar ferimentos e mortes, o que justifica o grande avanço tecnológico na segurança. Mesmo assim, o percentual de sobrevivência em acidentes fatais é de apenas 24% (Static Brain, 2017).

A Figura 1.1 ilustra o avanço na segurança da aviação, especialmente no que diz respeito às poltronas dos passageiros. Na Figura 1.1(a), o interior do avião da marca Boeing modelo 247 de 1933, em contraste com a moderna – e apertada – classe econômica do Boeing 787 de 2011 na Figura 1.1(b), depois de quase oitenta anos de evolução (Anderson, 2011).

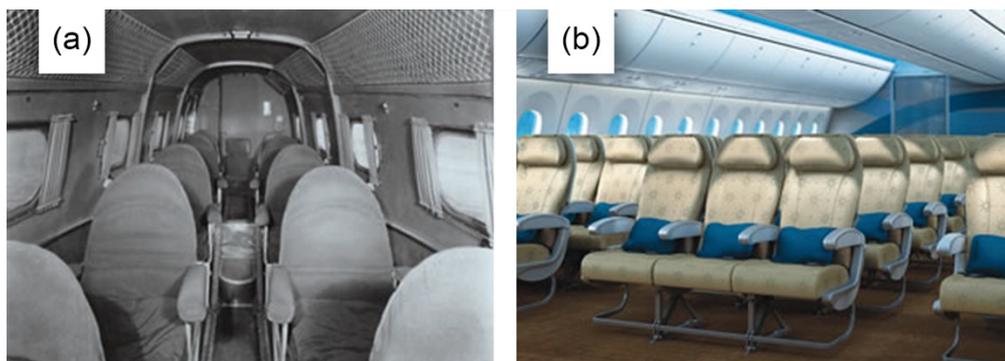


Figura 1.1 – (a) Interior do avião Boeing 247, de 1933, e (b) interior do avião Boeing 787, de 2011. (Adaptado de Anderson, 2011).

Do ponto de vista das companhias aéreas, a tendência é de maximizar o retorno financeiro. De acordo com Lariviere, 2012, em um voo hipotético de cem passageiros o lucro da companhia seria de apenas um assento. Deste modo, para aumentar o lucro, são usados alguns artifícios, como aumentar o número de passageiros por voo. Por exemplo, a lotação que em 2000 era de 72,3% passou para 82,1% em 2011, e a tendência é aumentar (Salomão, 2016). As companhias estão também reduzindo o espaço entre poltronas para encaixar uma ou duas fileiras a mais dentro do avião. Isso significa reduções que vão desde 2,5 até 12,5 cm, entre os anos de 1985 e 2014 (McGee, 2014).

A redução da distância entre poltronas possui implicações no conforto do passageiro e pode prejudicar também a sua segurança – dificultando, por exemplo, a locomoção no caso de evacuação pelas saídas de emergência, levando a colisão do ocupante com a poltrona da frente.

O objetivo do presente trabalho é apresentar um estudo de como as distâncias entre poltronas de um avião influenciam a probabilidade de severidade de lesões na cabeça e pescoço dos passageiros. Com auxílio do método de elementos finitos, cria-se um modelo simplificado de poltrona com um manequim, submetidos a velocidades e acelerações longitudinais e verticais determinadas de acordo com o regulamento vigente para certificação de poltronas em aeronaves. A poltrona possui um elemento que visa imitar seu comportamento a fim de aproximar o resultado obtido da realidade. Gradua-se a probabilidade da severidade de lesões na cabeça e pescoço dos ocupantes utilizando a escala abreviada de lesões (AIS – *Abbreviated Injury Scale*). Esse estudo representa um incremento do trabalho de Mazzotti, 2017, através do uso de condições de contorno mais realistas, permitindo uma discussão sobre conclusões preliminares ali apresentadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Análise Transiente Explícita

Análise transiente é utilizada para determinar a resposta dinâmica de um sistema com o tempo. Essa análise diferencia-se da análise estática pela presença da aceleração e pela importância que fatores como velocidades e inércias exercem sobre o sistema.

Os sistemas transientes seguem a equação básica (Rao, 2010):

$$M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{F}(t) \quad (3.1)$$

Sendo M a matriz de massa, C a matriz de amortecimento, K a matriz de rigidez, $\vec{F}(t)$ o vetor força em função do tempo e $\ddot{\vec{x}}$, $\dot{\vec{x}}$, \vec{x} os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente.

Análise transiente explícita significa que ao longo da análise transiente, não são necessárias iterações para resolver o problema (como seria necessário em uma análise estática) e as respostas de aceleração, por exemplo, são calculadas diretamente. Além disso, não é necessária a inversão da matriz de rigidez (Ls-Dyna).

2.2. Modelo Bi-Linear Elastoplástico

Su et al, 2016, definiram um modelo bi-linear elastoplástico para ligas de alumínio baseado no método de deformação contínua (*continuous strength method*, em inglês), cuja vantagem é um modelo de endurecimento por deformação, o qual possibilita a modelagem de rótulas plásticas. A Figura 2.1 apresenta uma comparação entre a curva medida de tensão-deformação e o modelo bi-linear.

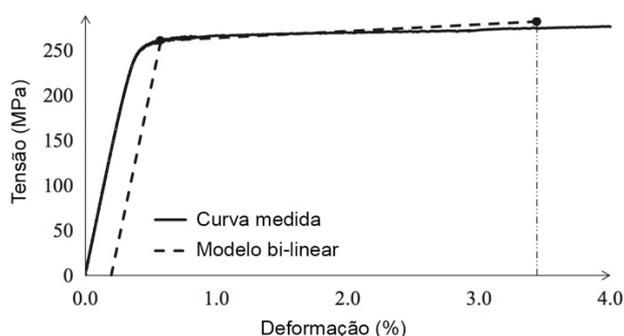


Figura 2.1 – Comparação entre a curva medida e o modelo bi-linear (Adaptado de Su et al, 2016).

2.3. Trabalhos Relacionados

NTSB, 1990, apresenta o estudo do acidente aéreo fatal da Avianca AVA052, em 1990. As poltronas deste avião foram certificadas de acordo com a norma que previa um teste estático de 9 g. Em 1986 entrou em vigor a nova regulamentação (FAA, 2015), mais rigorosa, que previa teste dinâmico de até 16 g para a certificação, mas a nova norma não propunha mudanças nas poltronas dos aviões em operação. No acidente, que ocorreu com a nova norma em vigor, algumas poltronas desprenderam-se completamente dos suportes, o que implicou ferimentos mais graves e mais mortes com os passageiros sendo arremessados de seus lugares. Caso as poltronas fossem certificadas pela nova norma, talvez o resultado fosse menos trágico.

O regulamento que entrou em vigor em 1986, primeira versão da atual FAA, 2015, prevê que as poltronas fabricadas após essa data sejam certificadas com testes dinâmicos de até 16 g. Uma vez que a idade média da frota das grandes empresas brasileiras não passa dos 20 anos (Airfleets, 2017), estima-se que a maioria dos aviões em operação para transporte de passageiros hoje tenha as poltronas certificadas de acordo com a norma recente.

A Figura 2.2 apresenta um esquema dos testes que devem ser realizados para a certificação das poltronas, de acordo com a última atualização do documento. Na Figura 2.2(a) e (b), são mostradas como devem ser as configurações dos ensaios e a Figura 2.2(c) apresenta o perfil de aceleração que a poltrona deve sofrer. Observa-se a presença das componentes

longitudinal e vertical da aceleração. Neste trabalho, apenas o Teste 1 é aplicável, visto que é o único que possui componente vertical da aceleração.

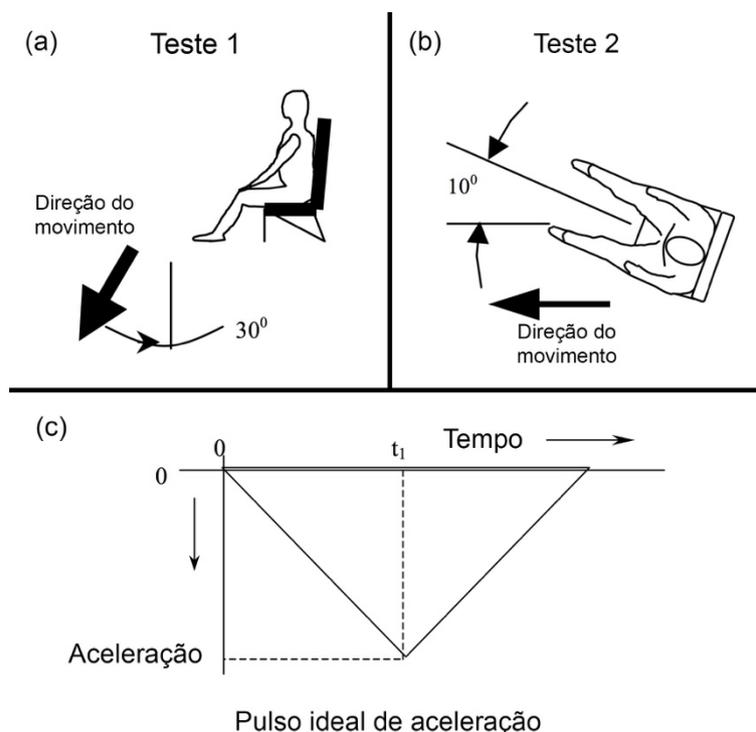


Figura 2.2 – Esquema dos testes de certificação de poltronas para aeronaves: (a) Teste 1, com componentes de aceleração normal (vertical) e longitudinal, (b) Teste 2 com componentes de aceleração lateral e longitudinal e (c) pulso ideal de aceleração do ensaio. (Adaptado de FAA, 2015).

Mazzotti, 2017, avaliou a importância da distância entre poltronas na probabilidade da severidade de lesão na cabeça e pescoço de passageiros de aviões. Para tanto, utilizou um modelo similar ao utilizado no presente trabalho, porém, apenas considerando a aceleração longitudinal, o que limita bastante o grau de realismo daquela simulação. Outra diferença foi a utilização de placas fixas para representar a poltrona à frente do manequim, não considerando a participação da poltrona no amortecimento do impacto. A conclusão foi que a taxa de sobrevivência aumenta e o risco de vida diminui à medida que a distância entre poltronas cresce.

A Agência Nacional de Aviação Civil, ANAC, classifica o conforto das aeronaves de acordo com sua distância entre poltronas – cada aeronave recebe um selo informando a classificação. Na Figura 2.3 é mostrada a classificação e suas respectivas distâncias, de acordo com ANAC, 2010. Mazzotti, 2017, utiliza três casos de acordo com as categorias A, C e E.

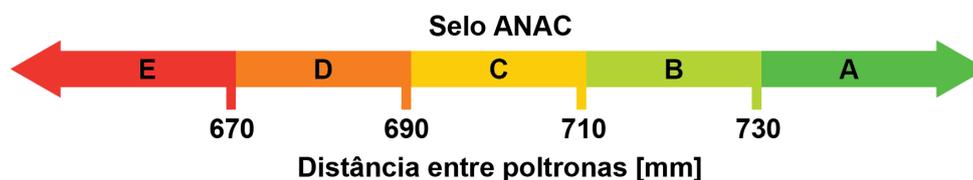


Figura 2.3 – Classificação da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) do conforto conforme distância entre poltronas.

2.4. Critérios de Lesões

Resposta biomecânica são alterações mecânicas ou fisiológicas no corpo humano ocasionadas por ação de cargas mecânicas. Em caso de dano – prejuízos ao funcionamento normal do corpo humano –, fala-se em lesão. (Deusmurkh, 2006).

Englobar todas as características da cabeça em um único critério de lesão é muito difícil. O crânio é uma casca rígida protegendo o cérebro, um material viscoelástico. Já na face, diferentes espessuras de ossos e músculos tornam a simplificação muito difícil. Juntando isso ao fato de existirem vários tipos de impacto (contra objetos planos, contundentes, cortocontundentes etc) seriam necessários vários tipos de critérios de lesões para avaliar com maior acurácia a severidade de lesões (Lima, 2009).

O critério mais utilizado, que pode ser aplicado ao caso geral, é o *Head Injury Criterion* (HIC), que mede o potencial de lesões decorrentes de acelerações lineares na cabeça e no cérebro. A equação para cálculo do HIC é:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right) \right]^{2,5} \right\}_{max} \quad (3.2)$$

Sendo $a(t)$ a aceleração, em m/s^2 , calculada no centro de massa da cabeça e $(t_2 - t_1)$, em s, o intervalo de tempo onde HIC é máximo – que pode assumir qualquer valor, representando o tempo que a aceleração age sobre a cabeça. É convencionalizado, porém, 15 ms para acidentes que envolvam contato direto da cabeça e 36 ms caso contrário (Lima, 2009).

Para quantificar a severidade de uma lesão, a escala *Abbreviated Injury Scale* (AIS) é a mais utilizada no mundo, segundo Lima, 2009. AIS é um código proposto pela Associação para o Avanço da Medicina Automotiva (AAAM, do inglês *Association for the Advancement of Automotive Medicine*) composto de sete números que informam tipo, local e severidade da lesão (Lesko et al., 2010). Neste trabalho avalia-se apenas o local (cabeça) e severidade, não importando o tipo de lesão. Os níveis AIS de severidade são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Escala abreviada de lesões (AIS) para a cabeça e nível de severidade correspondente. (Lima, 2009).

| AIS | Nível de Severidade |
|-----|---------------------|
| 0 | Sem lesão |
| 1 | Pequena |
| 2 | Moderada |
| 3 | Grave |
| 4 | Gravíssima |
| 5 | Risco à vida |
| 6 | Fatal |

A relação entre HIC e AIS para a cabeça do manequim utilizado é dado por um conjunto de equações ANEXO A cujas curvas são mostradas na Figura 2.4. Nela, a linha vertical apresenta um exemplo de HIC 1000. Cada zona representa uma probabilidade de ocorrer a lesão correspondente – por exemplo, há 36% de chance de ocorrer uma lesão AIS 3 (grave) e 10% de chance de ocorrer uma lesão AIS 1 (pequena). Observa-se que o aumento de HIC corresponde a um aumento da probabilidade de que ocorra uma lesão nível AIS 5 (risco à vida) ou AIS 6 (fatal), logo, quanto maior o HIC maior a severidade da lesão e maior o seu potencial de ser fatal (Lima, 2009).

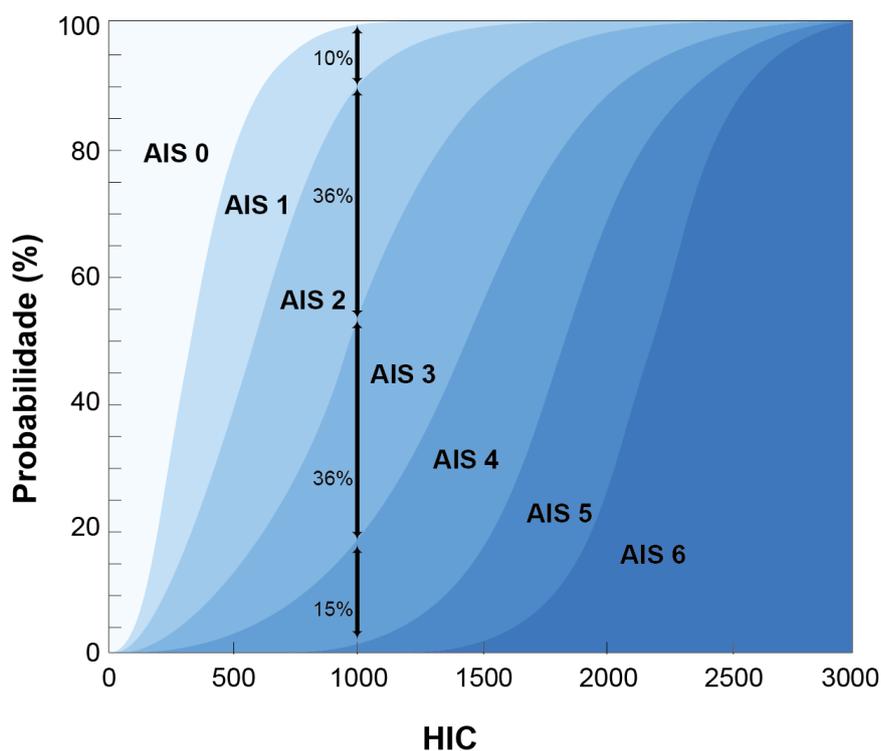


Figura 2.4 – Relação entre HIC e o nível de severidade da lesão AIS. (Adaptado de Lima, 2009).

O pescoço pode sofrer diferentes tipos de lesões, em vértebras, na medula espinhal e em tecidos. Porém, neste trabalho são avaliadas apenas as lesões da coluna cervical ocasionadas por cargas axiais de tração e compressão, forças cisalhantes e momento fletor longitudinal. Todos esses carregamentos devem ser medidos no cêndilo occipital, região superior do pescoço (Lima, 2009).

Nesse caso, há um critério limite para picos – apresentado na Tabela 2.2 – que indica uma lesão AIS 3 ou mais (AIS 4, 5 ou 6) quando ultrapassado (Lima, 2009).

Tabela 2.2 – Limites de carregamento – lesões no pescoço.

| Carregamento | Limite |
|--|-----------|
| Carga Axial de Tração | 3,30 kN |
| Carga Axial de Compressão | 4,00 kN |
| Força Cisalhante Longitudinal | 3,10 kN |
| Momento Fletor Longitudinal – Flexão (movimento da cabeça para frente) | 190,00 Nm |
| Momento Fletor Longitudinal – Extensão (movimento da cabeça para trás) | 57,00 Nm |

3. METODOLOGIA

3.1. Condições De Pouso

Neste trabalho será avaliada a condição de pouso forçado. Dados fornecidos pela fabricante Boeing (Boeing, 2017), mostram que, entre 2007 e 2016, 48% dos acidentes fatais ocorreram nas fases de aproximação final e pouso – que juntas representam apenas 4% do tempo de voo.

O Teste 1 do regulamento vigente (FAA, 2015) para certificação de poltronas de aviões é a situação mais próxima do escopo deste trabalho e, portanto, será recriado no modelo de

elementos finitos. As componentes longitudinais e verticais de aceleração são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Componentes de aceleração.

| Componente | Pico de Aceleração [m/s ²] |
|--------------|--|
| Longitudinal | 7,00 |
| Vertical | 12,12 |

3.2. Distância Entre Poltronas

Será utilizada a mesma abordagem de Mazzotti, 2017, porém utilizando casos abrangendo as cinco classificações da ANAC. Além disso, serão avaliados os casos mais extremos de 650 mm e de 630 mm de distância entre poltronas, com a finalidade de descobrir qual seriam os efeitos de reduções ainda maiores. Os testes que serão realizados estão descritos na Figura 3.1.

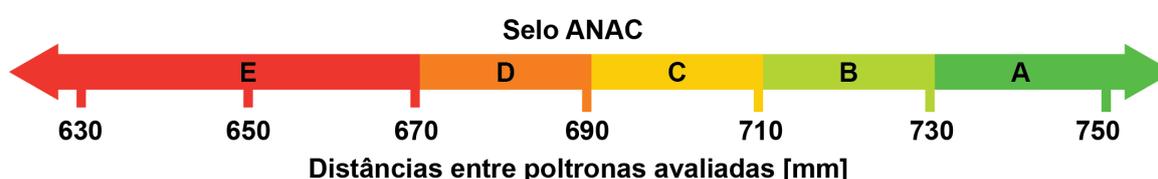


Figura 3.1 – Distâncias entre poltronas avaliadas e suas respectivas classificações conforme a ANAC.

3.3. Poltronas

A fim de reproduzir o efeito do impacto, supõe-se que, na poltrona da frente, apenas a junção estrutural do assento e do encosto absorve energia por meio de deformação, comportando-se como uma mola de torção. Para levar em consideração grandes deformações que poderiam levar à formação de uma rótula plástica na estrutura, o modelo supõe que o material, alumínio 6061-T6, comporta-se como um material bi-linear e segue o modelo descrito por Su et al, 2016.

O modelo de elementos finitos foi resolvido com auxílio do software Abaqus CAE, utilizando as propriedades do material mostradas na Tabela 3.2. A geometria da peça foi estabelecida com base em uma patente (Zimmermann et al, 2013) e seu desenho final pode ser observado na Figura 3.2. Para a análise de convergência de malhas três malhas foram criadas, e foram geradas as curvas resultantes de momento *versus* ângulo (rigidez de uma mola de torção). O resultado pode ser visto na Figura 3.3(a), enquanto a Figura 3.3(b) apresenta um esquema de onde estão localizados o ângulo e o momento em relação a A – localização da mola de torção.

Tabela 3.2 – Propriedades do Alumínio 6061-T6 (ASM, 2017).

| Modulo de Young | Coef. De Poisson | Tensão de Escoamento | Tensão Máxima |
|-----------------|------------------|----------------------|---------------|
| 69,8 GPa | 0,33 | 276 Mpa | 310 Mpa |

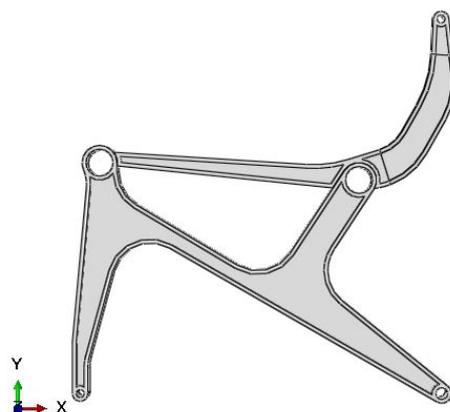


Figura 3.2 – Desenho da estrutura interna da poltrona.

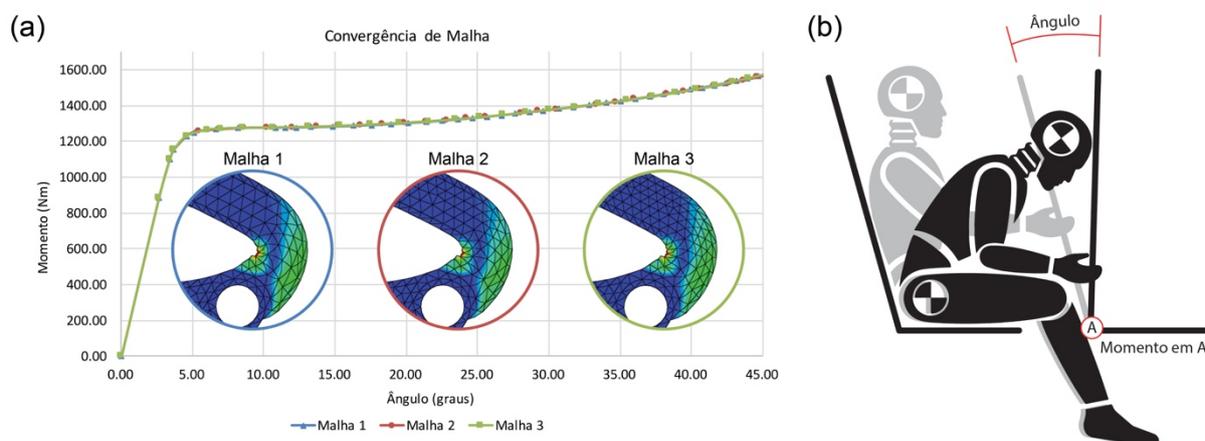


Figura 3.3 – Análise de convergência de malha: (a) curva de momento em A em função do ângulo e (b) esquema apresentando a localização do ponto A e do Ângulo).

A Figura 3.4 apresenta a configuração deformada sobreposta à configuração inicial, com a escala correspondente de deformação plástica equivalente.

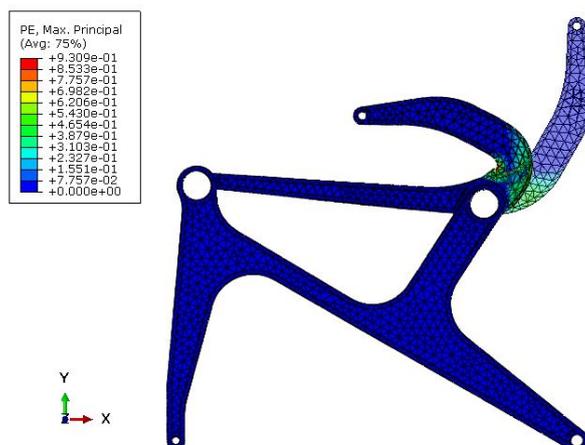


Figura 3.4 – Sobreposição da configuração inicial e deformada, na escala de deformação plástica.

Considerou-se que o encosto é formado por 65% de espuma e 35% de polímeros. A densidade da espuma foi estimada em 30 kg/m^3 (Foam Online, 2017) e a densidade do polímero,

em 1000 kg/m^3 (Vilar, 2012). A densidade do banco, de acordo com esses valores, foi estimada em 370 kg/m^3 .

De acordo com Mazzotti, 2017, as demais dimensões relevantes dos assentos e encostos foram selecionadas segundo dados contidos no livro *Airplane Design* (Roskam, 1986) as dimensões para os bancos conforme a Tabela 3.3. Como trata-se de um modelo simplificado, a mesma abordagem foi utilizada.

Tabela 3.3 – Dimensões da poltrona. (Mazzotti, 2017).

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| Largura da poltrona | 450 [mm] |
| Comprimento encosto | 780 [mm] |
| Inclinação encosto | 98° (em relação à horizontal) |
| Comprimento assento | 447 [mm] |

3.4. Manequim

O manequim utilizado é o 50th *Percentile Male* deformável (LSTC, 2017), que representa 50% da população masculina mundial. O manequim, que pode ser visto na Figura 3.5, é certificado por regulamentos norte americanos e europeus, além de ter a instrumentação necessária para o estudo proposto.

A Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam as dimensões e a massa do manequim e de sua cabeça, respectivamente.

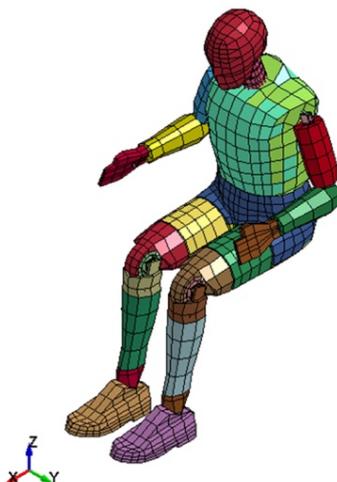


Figura 3.5 – Manequim utilizado.

Tabela 3.4 – Dimensões e massa do manequim. (Mazzotti, 2017)

| | |
|----------------|----------|
| Massa | 78 [kg] |
| Estatura | 1,75 [m] |
| Altura sentado | 0,88 [m] |

Tabela 3.5 – Dimensões e massa da cabeça do manequim. (Mazzotti, 2017)

| | |
|----------------|----------|
| Massa | 4,5 [kg] |
| Circunferência | 597 [mm] |
| Largura | 155 [mm] |
| Profundidade | 203 [mm] |

3.5. Análise Numérica

O pouso forçado é analisado para as distâncias descritas na seção 3.2 (Distância Entre Poltronas) com um software de elementos finitos capaz de resolver a análise transiente explícita necessária (Ls-Dyna, 2007).

O manequim é posicionado sentado sobre uma poltrona e preso em um cinto de segurança de dois pontos. Outra poltrona, com uma rótula plástica implementada, é posicionada à sua frente. Às poltronas são aplicadas as velocidades apresentadas na Figura 3.6 correspondentes às acelerações descritas na seção 3.1 (Condições De Pouso).

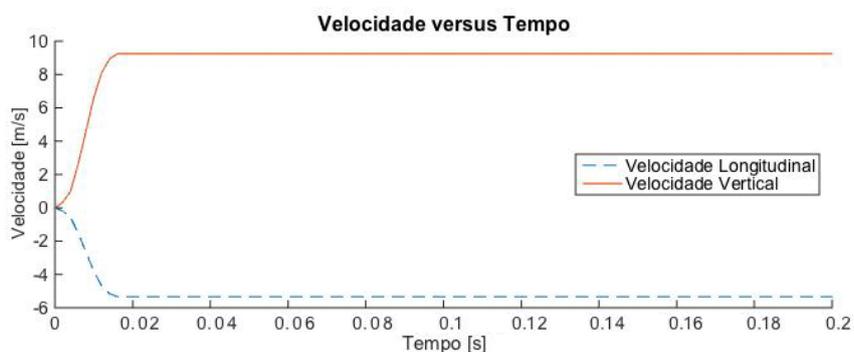


Figura 3.6 – Velocidade aplicada às poltronas.

As velocidades são aplicadas de modo a recriar os 0,2 s que ocorrem após o primeiro impacto do avião com o solo, momento em que a parte da aceleração que não foi absorvida pela estrutura da aeronave, atinge o passageiro.

Para tanto, aplica-se ao modelo parado (sistema inercial) uma variação de velocidade – determinada pelo regulamento da FAA, 2015 – que permanece constante após essa modificação. Como a variação da velocidade é aplicada nas poltronas, o manequim é arremessado contra o encosto à sua frente, resultando em acelerações na cabeça, utilizadas para determinar a severidade da lesão.

A configuração inicial das poltronas e do manequim é apresentada na Figura 3.7.

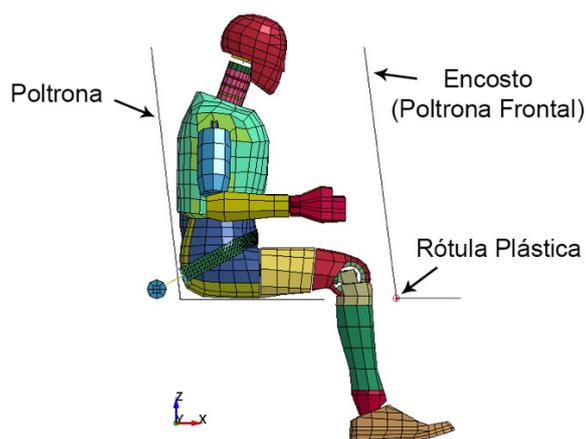


Figura 3.7 – Posição inicial do manequim, poltronas e cinto de segurança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia aqui proposta foi utilizada para o levantamento do histórico de variáveis dinâmicas atuando sobre o manequim durante o pouso forçado simulado. A Figura A.1 ilustra a configuração prevista para um passageiro durante os 0,2 s iniciais do evento. A partir desses históricos, é possível recuperar os valores de HIC, a fim de verificar o risco de lesões para um passageiro genérico, considerando-se as diferentes distâncias entre poltronas.

4.1. Lesões na Cabeça

O modelo do manequim fornece os históricos de acelerações na cabeça e o HIC 36 foi calculado de acordo com a Equação 3.2, sendo que o intervalo de tempo máximo foi fixado em 0,036 s. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.1.

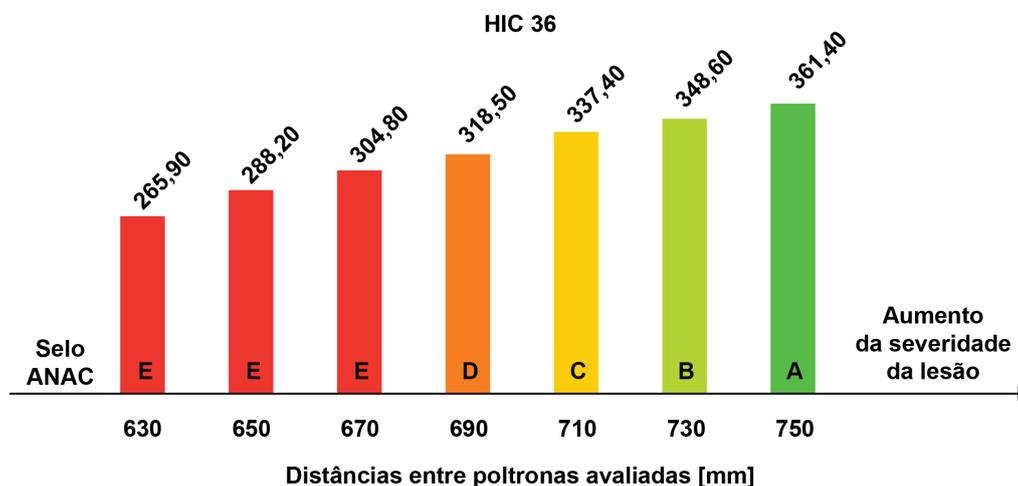


Figura 4.1 – Resultados do HIC 36.

Observa-se que, com o aumento da distância entre poltronas, o HIC aumenta. Esse aumento pode estar relacionado com o tempo que a cabeça tem para acelerar antes de atingir o encosto – isso significa que a posição de emergência pode fazer diferença na severidade de ferimentos, visto que uma das orientações é posicionar a cabeça junto à poltrona da frente. É importante ressaltar que esse resultado contradiz alguns das conclusões preliminares propostas por Mazzotti, 2017.

Ao traduzir os resultados de HIC para escala AIS (cabeça), obtém-se as probabilidades apresentadas na Figura 4.2.

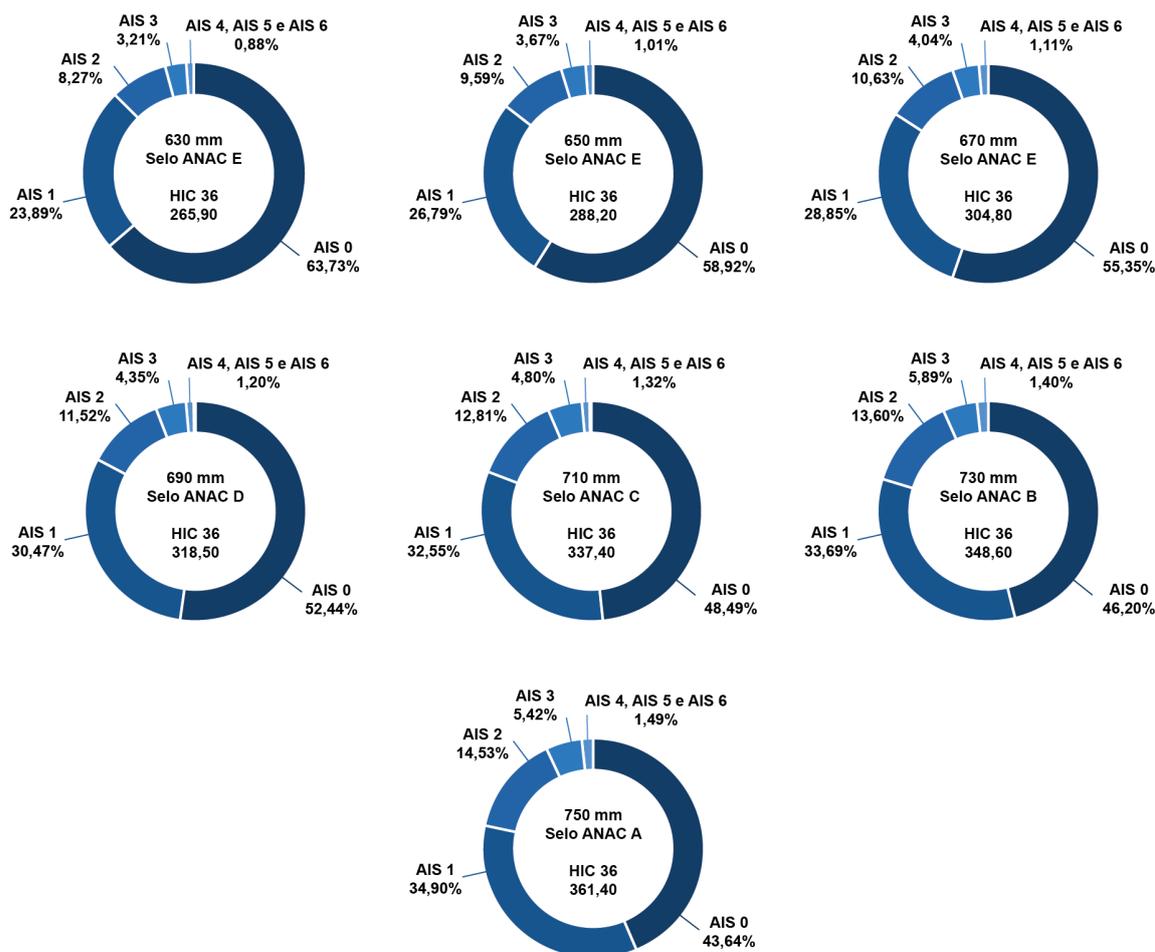


Figura 4.2 – Probabilidades de severidade de lesão.

4.2. Lesões no Pescoço

Já para o caso de lesão no pescoço, os valores máximos de força cisalhante retirados dos históricos foram comparados com os valores limites listados na Tabela 2.2. Os resultados de força cisalhante obtidos são apresentados na Figura 4.3. Observa-se que, em todos os casos, o passageiro sobreviveria com lesões moderadas ou menos severas, visto que o limite de 3,10 kN não foi atingido.

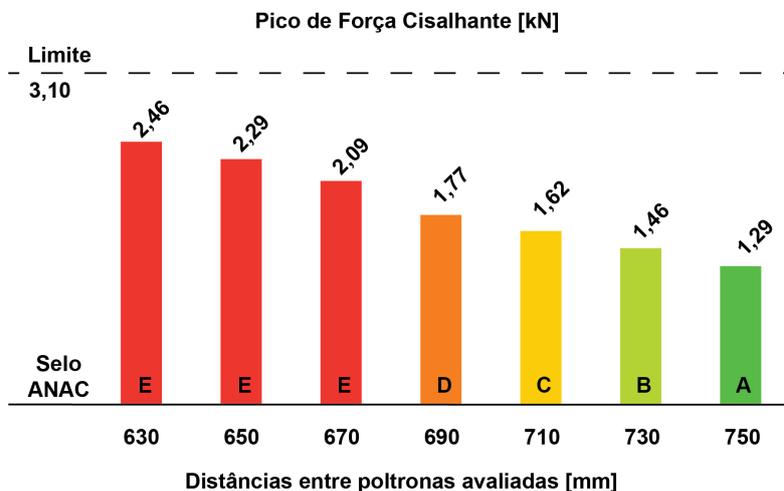


Figura 4.3 – Pico de força cisalhante.

Resultados similares para momento fletor longitudinal de flexão e de extensão são apresentados nas Figura 4.4 e Figura 4.5 respectivamente, bem como o limite tolerável de cada um. Observa-se que com as distâncias de 690, 710, 630 e 750 mm o passageiro sofreria lesões graves ou mais severas devido ao momento de extensão acima do limite de 57,00 Nm.

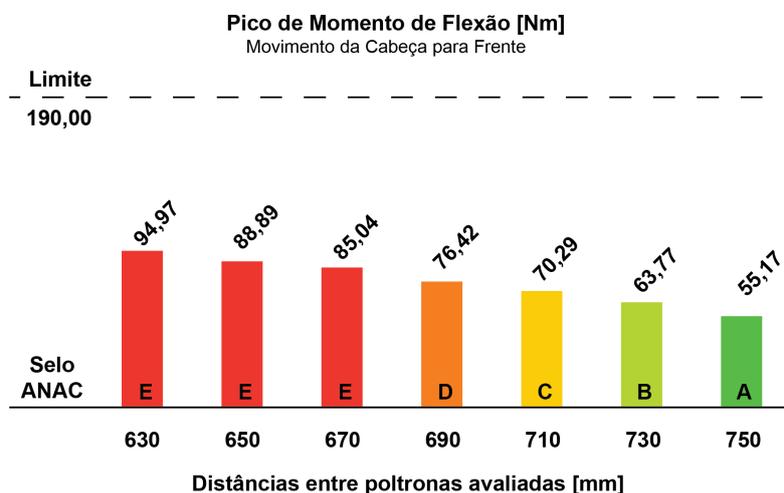


Figura 4.4 – Pico de momento fletor de flexão.

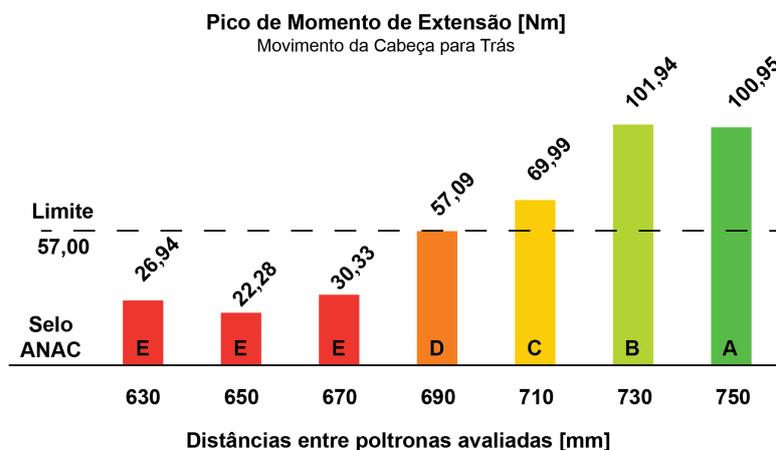


Figura 4.5 – Pico de momento fletor de extensão.

Os valores máximos de momento fletor de extensão apresentados ocorreram, no entanto, em um instante de tempo posterior ao impacto, em que não é possível afirmar se o modelo representa bem a realidade.

Os resultados de carga axial de compressão e de tração obtidos são apresentados nas Figura 4.6 e Figura 4.7 respectivamente. Observa-se que com a distância de 630 mm o passageiro também sofreria uma lesão grave ou mais severa devido à força de tração acima do limite de 3,30 kN.

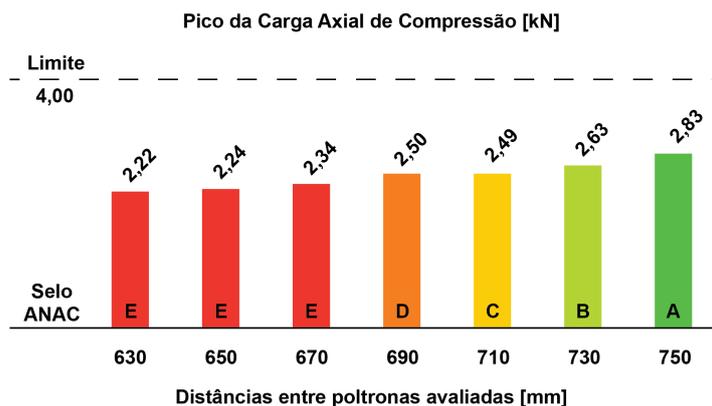


Figura 4.6 – Pico de carga axial de compressão.

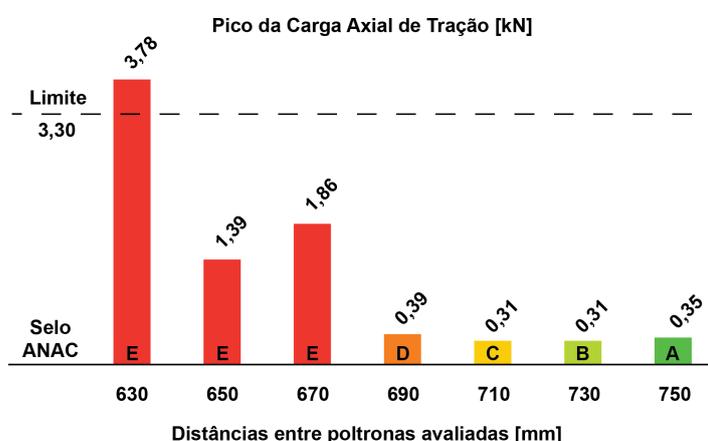


Figura 4.7 – Pico de carga axial de tração.

Da mesma maneira que o momento fletor de extensão, os valores máximos da carga axial de tração apresentados também ocorreram em um instante de tempo posterior ao impacto, não sendo possível afirmar que o modelo representa bem a realidade.

Percebe-se que, ao aumentar a distância entre poltronas, tanto o HIC como a carga axial de compressão e momento de extensão aumentam, enquanto que a força cisalhante, a carga axial de tração e o momento de flexão diminuem, embora nem sempre haja uma relação linear entre as variáveis e a distância entre poltronas.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que a consideração de efeitos de absorção de impacto no encosto da poltrona do passageiro à frente, bem como a adição da componente vertical da aceleração gerou resultados contrários à estudos preliminares (Mazzotti, 2017).

A partir dos resultados aqui obtidos, observou-se que o risco de vida aumenta com o aumento da distância entre poltronas – embora poltronas muito próximas possam também aumentar o risco de vida do passageiro. Essa conclusão foi possível através da observação do *Head Injury Criterion* (HIC) – utilizado para medir o potencial de lesões na cabeça –, da escala *Abbreviated Injury Scale* (AIS) – utilizada para quantificar a severidade da lesão – e da análise do critério limite para forças e momentos atuando sobre o pescoço. O incremento de complexidade da presente metodologia de análise em relação ao trabalho de Mazzotti, 2017, reveste esta versão da análise de maior realismo, e sugere conclusões intuitivamente mais lógicas. Evidencia-se, portanto, que o comportamento da poltrona à frente do passageiro influencia diretamente nos resultados. Deve-se observar, porém, que uma análise dinâmica da estrutura da poltrona é mais adequada para a obtenção da curva de momento *versus* ângulo,

pois efeitos dinâmicos da plastificação foram desconsiderados neste trabalho ao realizar-se uma análise estática.

Em trabalhos futuros, poderão ser abordadas questões como a posição de emergência quanto à sua efetividade na proteção contra ferimentos, ou a possível existência de uma distância ótima entre poltronas, que leve em consideração aspectos de segurança, lucro das companhias aéreas e de conforto, simultaneamente. É possível, também, alimentar o modelo com dados de aceleração e velocidade de um pouso forçado real em lugar de valores normalizados exigidos pelas legislações. Além disso, pode ser criado um modelo mais realista da poltrona, dada a sua importância apresentada neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AirFleets; “**Airline Fleet Age**”. Disponível em: <<http://www.airfleets.net/ageflotte/fleet-age.htm>>. Acesso em: 22 de novembro de 2017.

ASM, Aerospace Specifications Metals, Inc.; “**Aluminum 6061-T6**”. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>>. Acesso em 19 de setembro de 2017.

ANAC – (Agência Nacional de Aviação Civil); “**Programa De Avaliação Dimensional: Selo ANAC**”. Anexo à Resolução ANAC N° 135, 7 p., março de 2010.

Anderson, A. J.; “**Aviation safety: evolution of airplane interiors**”. Boeing Aeromagazine, abril de 2011. Disponível em <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2011_q4/2/>. Acesso em: 23 de novembro de 2017.

Boeing Commercial Airplanes; “**Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, July 2017**”. Disponível em: <www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>. Acesso em 23 de setembro de 2017.

Deusmurkh, P.S.; “**Rollover and Roof Crush Analysis of Low-Floor Mass Transit Bus**”, Master of Science, Wichita State University, 2006.

FAA – (Federal Aviation Administration) – U.S. Department of Transportation; “**Dynamic Evaluation of Seat Restraint Systems and Occupant Protection on Transport Airplanes**”, AC 25.562-1B, 2015.

Foam Online; “**Descriptions of Foam Types, Qualities and Common Uses**”. Disponível em: <<http://www.foamonline.com/types.php?cartID=60c3bb9c2dad8a63cb4d8c79932cefdb>>. Acesso em: 12 de novembro de 2017.

Lariviere, M.; “**Airlines: Where does all the money go?**”. The Operations Room, janeiro de 2012. Disponível em: <<https://operationsroom.wordpress.com/2012/06/12/airlines-where-does-all-the-money-go/>>. Acesso em: 23 de novembro de 2017.

Lesko, M. M.; Woodford, M.; White, L.; O'Brien, S. J.; Childs, C.; Lecky, F. E.; “**Using Abbreviated Injury Scale (AIS) codes to classify Computed Tomography (CT) features in the Marshall System**”, BMC Medical Research Methodology, 10 p., 2010.

Lima, A.; “**Simulação Numérica de Capotamento de Veículos Automotores – Comparação entre Normas e Verificação de Riscos de Lesão ao Condutor**”. 2009. 188 f. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2009.

LS-Dyna support; **“What are the differences between implicit and explicit?”**. Disponível em: <<http://www.dynasupport.com/faq/general/what-are-the-differences-between-implicit-and-explicit>>. Acesso em: 12 de novembro de 2017.

Ls-Dyna; **“Keyword User’s Manual”**, Livermore Software Corporation, California, EUA, 2007.

LSTC – (Livermore Software Technology Corporation); <<http://www.lstc.com>>. Acesso em 16 de setembro de 2017.

Mazzotti, K. L.; **“Avaliação da probabilidade do risco de lesões na cabeça e pescoço em passageiros de aviões com relação à distância entre assentos no caso de colisão com o solo”**. Monografia, 23 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

McGee, B.; **“Think airline seats have gotten smaller? They have”**. USA Today, setembro de 2014. Disponível em: <<https://www.usatoday.com/story/travel/columnist/mcgee/2014/09/24/airplane-reclining-seat-pitch-width/16105491/>>. Acesso em: 22 de novembro de 2017.

NTSB – (National Transportation Safety Board); **“Avianca Airlines flight 52, B707”**. Relatório de Acidente Aéreo, Washington DC, janeiro de 1990, 295 p., 1990.

Rao, S.S.; **“Mechanical vibrations”**, Prentice Hall, 5th ed, 1084 f. 2010.

Roskam, J.; **“Airplane design – Part III: Layout design of cockpit, fuselage, wing and empennage: cutaways and inboard profiles”** Roskam Aviation and Engineering Corporation, Ottawa, Kansas, 1986.

Salomão, K.; **“Gol transformou menos voos em mais lucros”**. Exame, São Paulo, novembro de 2016. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/gol-transformou-menos-voos-em-mais-lucros/>>. Acesso em: 22 de novembro de 2017.

Static Brain; **“Airplane Crash Statistics”**. Statistic Brain Research Institute, maio de 2017. Disponível em <<https://www.statisticbrain.com/airplane-crash-statistics/>>. Acesso em: 23 de novembro de 2017.

Su, M.-N.; Young, B.; Gardner, L.; **“The continuous strength method for the design of aluminium alloy structural elements”**, Engineering Structures, 122, p. 338-348, 2016.

Vilar, W.; **“Química e Tecnologia dos Poliuretanos”**. Vilar Consultoria, 3ª ed., Rio de Janeiro, dezembro de 2004.

Zimmermann, P.; Soetebier, U.; Isels, F.; Grünberg, J.; **“Kit for seat rows in aircraft”**, United States Patent, número US 8393680 B2. Março de 2013

ANEXO A

As equações de A.1 até A.7 são utilizadas para conversão do HIC para a escala AIS. Estas equações são aplicáveis apenas para calcular a probabilidade de lesões na cabeça do manequim utilizado neste estudo. (Lima, 2009).

$$AIS\ 0 = 1.0 - \left[1 + \exp \left(\left(1,54 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{6,5HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.1)$$

$$AIS\ 1 = \left[1 + \exp \left(\left(1,54 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{6,5HIC}{1000} \right) \right]^{-1} - \left[1 + \exp \left(\left(2,49 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{4,83HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.2)$$

$$AIS\ 2 = \left[1 + \exp \left(\left(2,49 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{4,83HIC}{1000} \right) \right]^{-1} - \left[1 + \exp \left(\left(3,39 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{3,72HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.3)$$

$$AIS\ 3 = \left[1 + \exp \left(\left(3,39 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{3,72HIC}{1000} \right) \right]^{-1} - \left[1 + \exp \left(\left(4,9 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{3,51HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.4)$$

$$AIS\ 4 = \left[1 + \exp \left(\left(4,9 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{3,51HIC}{1000} \right) \right]^{-1} - \left[1 + \exp \left(\left(7,82 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{4,29HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.5)$$

$$AIS\ 5 = \left[1 + \exp \left(\left(7,82 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{4,29HIC}{1000} \right) \right]^{-1} - \left[1 + \exp \left(\left(12,24 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{5,65HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.6)$$

$$AIS\ 6 = \left[1 + \exp \left(\left(12,24 + \frac{200}{HIC} \right) - \frac{5,65HIC}{1000} \right) \right]^{-1} \quad (A.7)$$

APÊNDICE A

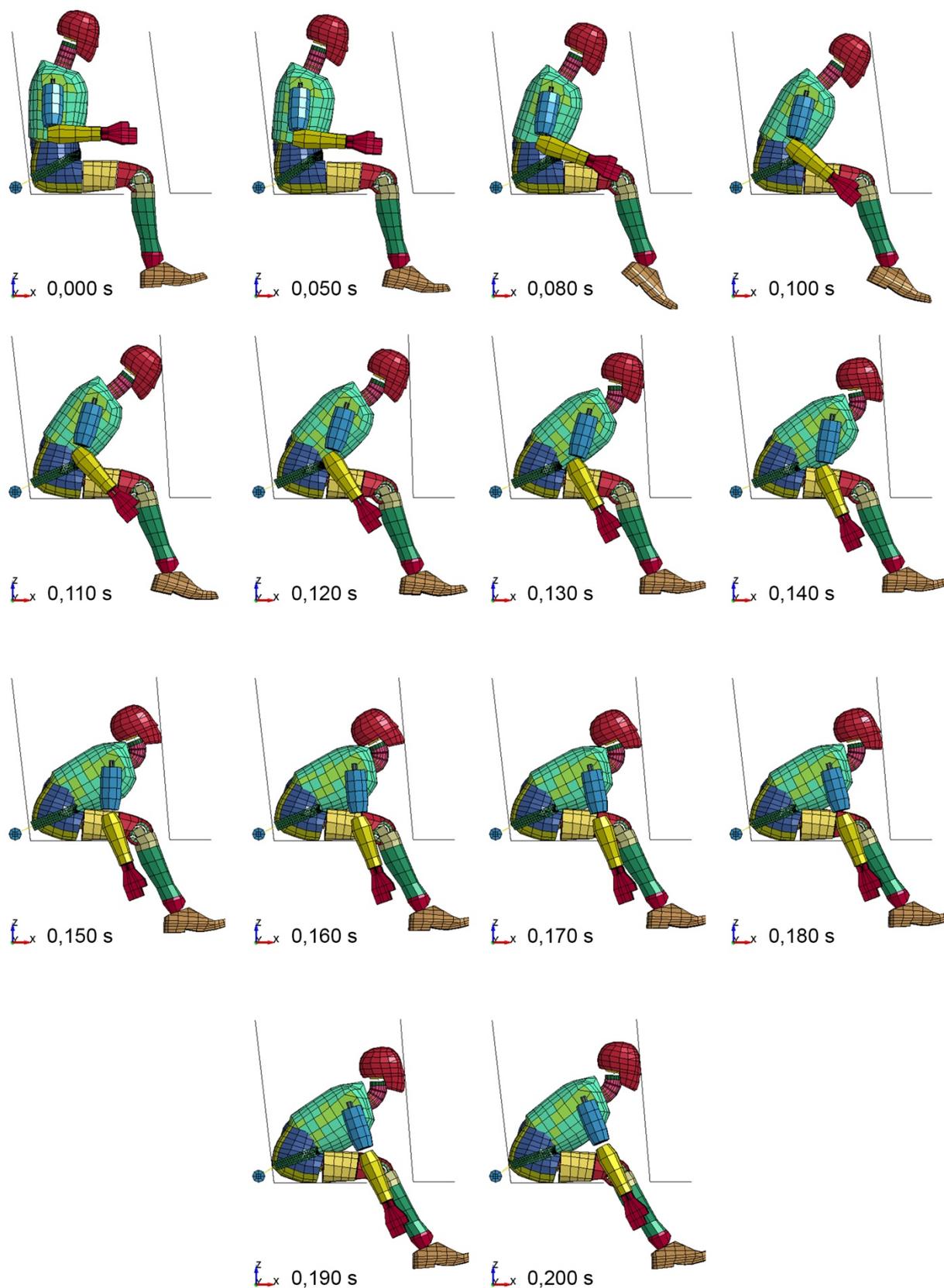


Figura A.1 – Ilustração da resposta dinâmica da análise, em alguns instantes de tempo.