



## PROGETTI MECCANICI: DIMENSIONAMENTO DI ALBERI CON CORREZIONE PER CHIAVETTE E SUPPORTO CUSCINETTI

### REVISIONE ARTICOLO

MENEGRIN, Pedro Henrique<sup>1</sup>, LOPES, Cintia Abdelnur<sup>2</sup>

MENEGRIN, Pedro Henrique. LOPES, Cintia Abdelnur. **Progetti meccanici: dimensionamento di alberi con correzione per chiavette e supporto cuscinetti.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Anno. 07, Ed. 05, vol. 06, pagg. 56-76. Maggio 2022. ISSN: 2448-0959, Link di accesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingegneria-meccanica-ingegneria/progetti-meccanici>,

DOI:

10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/ingegneria-meccanica-ingegneria/progetti-meccanici

### RIEPILOGO

Questo articolo passa attraverso diverse fasi al fine di fornire un risultato affidabile, secondo il metodo ASME, di un dimensionamento di un pozzo, con l'obiettivo di automatizzare il processo di calcolo memoriale per i progetti di pozzo. Le fasi di progettazione sono: diagrammi delle sollecitazioni, analisi della fatica e della geometria (se necessario); correzione per discontinuità (se presente); correzione del diametro dell'albero per chiavette (se presente); e correzione dovuta al supporto cuscinetti scelto dal produttore (adozione dei modelli SKF). In questo modo, l'articolo si propone, per rispettare la letteratura e le norme, di dimensionare gli alberi di trasmissione. I risultati degli esercizi risolti nel libro *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada* saranno utilizzati come riferimento. Il programma sviluppato mira a soddisfare le esigenze sia professionali che accademiche ottimizzando i calcoli per ottenere il diametro di un albero. Inoltre, il progetto è giustificato dal fatto che consente diverse modifiche per una migliore comprensione, sia per un designer che per uno studente. Il software utilizzato per automatizzare i processi e ottenere i risultati sarà *Mathcad Prime 5.0* di PTC Enterprise. Alla fine dell'articolo, insieme ai risultati e alla conclusione, ci sono esempi di problemi di progettazione risolti dal programma, insieme alle loro spiegazioni e confronti con i risultati ottenuti nel libro di Norton.



Parole chiave: Automazione, Dimensionamento alberi, Progettazione macchine.

## 1. INTRODUZIONE

Norton (2013) afferma che gli alberi di trasmissione sono componenti estremamente importanti praticamente in tutte le parti delle macchine rotanti, poiché trasmettono la rotazione e la coppia da un punto all'altro (da una parte all'altra). In questo modo, un progettista di attrezature di macchina è sempre a contatto con l'arduo compito di dimensionare gli alberi.

Niemann (1971) definisce ancora che gli assi servono solo a sostenere parti di macchina, fisse, mobili od oscillanti e afferma che gli assi sono chiamati a torsione, ovvero torsione e flessione.

I costrutti cinematici fondamentali del nostro universo meccanico sono la ruota e l'asse. Un pezzo essenziale di questo giunto di rivoluzione è l'albero, in quanto costituisce un buon esempio di un corpo carico quasi statico e dinamico. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Con questi presupposti, l'articolo consiste nella costruzione di un programma in grado di fornire il valore di un asse, attraverso informazioni prestabilite, avente flessione e torsione variate per coppia.

Come afferma Hibbeler (2010) a proposito delle prestazioni degli assi e delle loro richieste:

O resultado é que muitas vezes estarão sujeitos à tensão cíclica ou de fadiga, causadas pelas cargas combinadas de flexão e torção que devem transmitir, ou às quais devem resistir. Além dessas cargas, podem existir concentrações de tensão em um eixo devido a chavetas, acoplamentos e transições repentinhas em sua área de seção transversal. Portanto, para projetar um eixo de forma adequada, é necessário levar em conta todos esses efeitos.



Analizzando il paragrafo precedente, si avverte la necessità di apportare correzioni al dimensionamento del vano. Per tale calcolo, i valori trovati nel primo momento, che sono le componenti alternate e medie del Momento Flettente e del Momento Torcente, serviranno per apportare le necessarie correzioni. L'asse passerà quindi attraverso due fasi di correzione: resistenza (fatica) e geometrica.

In questa fase, le analisi verranno eseguite tramite *Excel* per ridurre al minimo gli errori nel diametro trovato. Successivamente, il valore corretto verrà arrotondato in base alla conformità di produzione.

Con ciò, il programma correggerà il diametro trovato in modo che possa essere utilizzato con chiavette e supporto cuscinetti. Il tipo di chiavette stabilito nel programma è parallelo all'albero. Inoltre, se c'è una discontinuità nell'albero, questa verrà ricalcolata a causa delle concentrazioni di sollecitazioni, generate dalla creazione della sede fresata nel corpo dell'albero.

Quindi, ricalcolare il diametro se l'albero è accoppiato a uno o più supporto cuscinetti, entrambi cuscinetti volventi.

Tutti gli assi calcolati verranno controllati con un fattore di sicurezza che verrà stabilito dall'utente.

Secondo gli autori Ferreira; Campos e Dias (2017) sull'uso del *software* in un ambiente studentesco:

Existe a possibilidade da aprendizagem individualizada ser favorecida com o uso desse recurso tecnológico, já que ele só executa o que lhe é mandado, limitando-se ao potencial do usuário. O que permite ao professor ter uma visão clara de qual a limitação do seu aluno, e assim poder ajudá-lo de uma forma mais precisa. Sem contar que o educando ganha autonomia na hora de realizar seus trabalhos. Além da aprendizagem individualizada as salas informatizadas também facilitam a aprendizagem em grupo, pois os ambientes se tornam mais dinâmicos, as atividades são



desenvolvidas com menos imposição, os alunos perdem o medo de errar, eles se auto-ajudam na realização das tarefas, e isso tudo favorece a uma nova socialização.

Da queste osservazioni, la rilevanza dell'articolo è quella di poter aiutare in classe, come nelle materie di Meccanica dei solidi, Elementi di macchine e Progettazione di macchine, poiché la classe stessa diventa più visiva. Quindi, trattandosi di discipline che richiedono molti calcoli e finiscono per diventare estenuanti, il *software* aiuterà nelle dinamiche della classe, come accennato nel paragrafo precedente.

Può essere utilizzato anche come strumento per disegnare assi reali, in quanto la metodologia di calcolo utilizzata non è meramente teorica, avvalendosi del metodo ASME.

Pinheiro *et al.* (2014) affermano che a causa dell'elevato numero di equazioni e dell'interconnessione di fattori tra i calcoli, è di fondamentale importanza utilizzare *software* di calcolo per ottimizzare i tempi di progettazione. E, con questi *software*, forniscono anche un confronto più veloce se è necessario modificare qualche parametro per un asse desiderato. In sintesi, il programma mira a facilitare e ottimizzare i tempi di progettazione degli alberi nelle sue diverse applicazioni.

Attualmente molti *software* possono essere utilizzati per assistere nelle fasi di dimensionamento. Ad esempio, è possibile ottenere i diagrammi dei momenti flettenti dal *software* FTOOL, mentre le routine di calcolo possono essere create utilizzando *software* come MATLAB, MATHCAD o EES. (PINHEIRO; NOGUEIRA; COSTA, 2014).

Pertanto, l'articolo ha l'obiettivo generale: creare un programma che funga da routine di calcolo in *Mathcad* per progettare gli assi.

Gli obiettivi specifici sono: ottenere il diametro dell'albero con fattori di sicurezza a fatica.



La fatica è un cambiamento nella struttura di un elemento meccanico che avviene in modo localizzato, progressivo e permanente. Si verifica quando gli elementi sono soggetti a sollecitazioni variabili, causate da carichi dinamici. (SUSA, 2011).

a) Correggere il diametro dell'albero per il fattore geometrico.

I possibili guasti che può avere l'albero di trasmissione della potenza, secondo Collins (2006), sono: per fatica; rottura per deformazione elastica indotta dalla forza (resistenza); e cedimento per usura (geometrico).

b) Correggere il diametro precedente se c'è una discontinuità nell'albero.

Secondo Norton (2013), in alcuni casi il progetto di un asse può essere eseguito senza alcuna variazione nella sua sezione, ma è più comune avere bisogno di spallamenti o gradini. Questo perché, in diverse dimensioni, l'albero deve essere adattato per elementi fissi, come i supporto cuscinetti che verranno discussi qui nel programma sviluppato.

In questo modo, se l'albero da progettare deve avere più di un diametro, il programma effettuerà la correzione necessaria con l'albero che presenta due valori di dimensionamento.

c) Ottenere il diametro corretto creando un'asola dovuta all'utilizzo di una eventuale chiavette sull'albero, con i suoi fattori di sicurezza accettabili: taglio e schiacciamento.

Secondo Juvinall e Marshek (2008) la chiavette è una delle connessioni più comuni tra un albero e un mozzo di trasmissione.

Juvinall e Marshek (2008) affermano inoltre che, quando un diametro dell'albero è progettato in base alla resistenza, la chiavette deve essere inclusa nei calcoli,



poiché, con questa chiavetta, si genera anche una concentrazione di sollecitazione.

Norton (2013) afferma, a proposito del tipo di chiavette che verrà utilizzata per il dimensionamento, che le chiavette parallele hanno le loro particolari dimensioni delle sezioni trasversali e la profondità delle sedi, o asole, standardizzate da ANSI e ISO.

d) Ottenere il diametro corretto da accoppiare ad un supporto cuscinetti volvente: sferico o cilindrico.

Secondo Norton (2013), i supporto cuscinetti volventi possono essere utilizzati per consentire un basso attrito. In genere vengono scelti dai cataloghi dei produttori per adattarsi ai carichi relativi a un determinato progetto. Inoltre, tali supporto cuscinetti possono sopportare carichi radiali, assiali o anche una combinazione di entrambi, a seconda del design.

Il focus del software sviluppato sarà in relazione ai disegni degli alberi, e quindi non avrà profondità nei disegni dei supporto cuscinetti che saranno usati solo come fattori di correzione per i diametri degli alberi.

e) Fornire i valori effettivi del diametro o dei diametri dell'albero e le loro specifiche quando richiesto.

## 2. MATERIALE E METODO

Il materiale principale utilizzato sarà il lavoro di Norton, *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada*, 4th ed., 2013. Questo lavoro è stato scelto perché propone una sequenza logica di facile comprensione per i calcoli che verranno eseguiti. Con tale materiale e script preparati durante il corso nelle classi *Machine Element*, il metodo utilizzato per i calcoli sarà tramite il software *MathCad Prime 5.0* di PTC



*Enterprise*. Tale software ha una logica di programmazione equivalente al linguaggio C.

Il software in questione avrà l'aiuto di *Excel* per la formazione di grafici, con i dati ottenuti nel lavoro di Norton, per apportare le modifiche necessarie per aggiungere dati più efficienti al progetto. Per confrontare i valori verrà utilizzato il sito *Wolfram Alpha* (un sito destinato a presentare soluzioni matematiche, dai semplici polinomi alle integrazioni complesse), poiché presentava le stesse risposte trovate nel lavoro citato nel paragrafo precedente.

Il programma sviluppato per il dimensionamento degli alberi avrà un formato di programmazione **if, else e for**. Ciò garantisce risultati più accurati e più rapidi e consente di automatizzare i calcoli ogni volta che è necessario modificare un fattore.

L'istruzione **if-else** è una delle istruzioni di controllo del flusso del linguaggio C. Consente di indicare le circostanze in cui deve essere eseguita una determinata istruzione o un insieme di istruzioni. (DAMAS, 2007).

Damas (2007) spiega anche che tale istruzione funziona come "vero o falso". Se la condizione stabilita (**if**) è vera, esegue la prima istruzione e, se falsa, esegue la seconda (**else**).

L'istruzione for (o ciclo **for**, come è comunemente noto), è particolarmente adatta a situazioni in cui il numero di iterazioni è noto a priori. (DAMAS, 2007).

Quindi, come spiega Damas (2007), l'istruzione **for** è un metodo iterativo utilizzato quando è noto quante volte o anche quando un dato valore deve essere iterato per arrivare a un valore ammissibile.

Pertanto, il programma consentirà l'automazione dei calcoli per il dimensionamento degli assi, anche con condizioni specifiche per determinate equazioni.



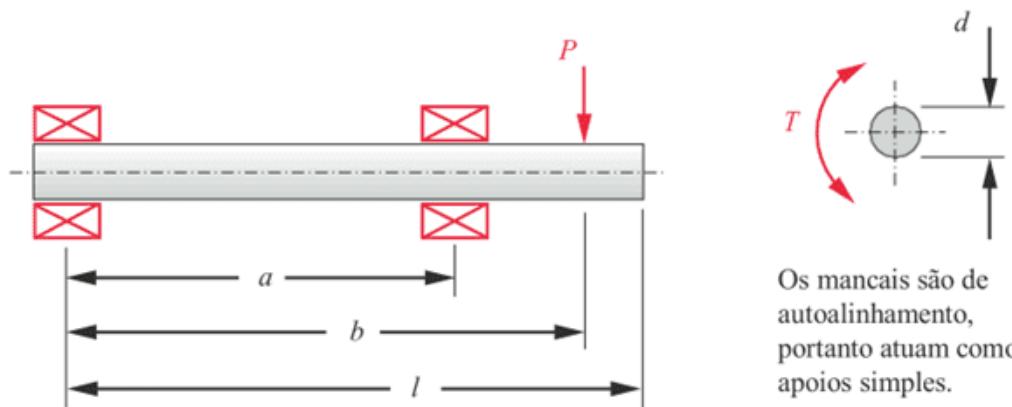
### 3. RISULTATI

I risultati saranno presentati come segue: in primo luogo, gli esercizi dal libro *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada* (NORTON, 2013), evidenziando i dati di input. Dopo ogni problema, i risultati ottenuti dal software di progetto. Le spiegazioni necessarie si trovano insieme allo sviluppo dei risultati.

#### 3.1 PROBLEMA DEL PROGETTO 1

L'esercizio seguente mostra un progetto per un albero uniforme, polarizzato, con coppia variabile e con un carico applicato dopo il suo ultimo appoggio di riferimento.

Figura 1 – Problema 1



Os mancais são de autoalinhamento, portanto atuam como apoios simples.

\*<sup>T</sup>10-1 Um eixo biapoiado é mostrado na Figura P10-1. Uma carga transversal de magnitude constante  $P$  é aplicada à medida que o eixo roda sujeito a torque variável com o tempo que varia de  $T_{min}$  a  $T_{max}$ . Para o valor na(s) linha(s) assinalada(s) da Tabela P10-1, encontre o diâmetro requerido do eixo para obter um coeficiente de segurança de 2 relativo à carga de fadiga se o eixo é de aço de  $S_u=108$  kpsi e  $S_y=62$  kpsi. As dimensões são em polegadas, a força em libras e o torque em lb-in. Pressuponha que não existam concentrações de tensão.

Fonte: Norton (2013).



Tabella 1 - Valori dell'anno

**Tabela P10-I Dados para problemas**

Linha	<i>l</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>P ou p</i>	<i>T<sub>min</sub></i>	<i>T<sub>max</sub></i>
<i>a</i>	20	16	18	1000	0	2000
<i>b</i>	12	2	7	500	-100	600
<i>c</i>	14	4	12	750	-200	400
<i>d</i>	8	4	8	1000	0	2000
<i>e</i>	17	6	12	1500	-200	500
<i>f</i>	24	16	22	750	1000	2000

Fonte: Norton (2013).

La tabella 1 contiene i dati per risolvere l'esercizio. La riga in verde presenta quelle che verranno utilizzate per confrontare le risposte nel libro con quella ottenuta dal progetto in questione.

Figura 2 – Risposta al primo esercizio

10-1 Fila (a)  $d = 1,188$  in, suposto usinato, 99% de confiabilidade e 37°C.

Fonte: Norton (2013).

Sopra, in Figura 2, si osserva che il risultato del diametro dell'albero è pari a 1,188 pollici.

Di seguito è riportata un'immagine della pagina iniziale del progetto, nella quale l'utente deve comunicare i valori dei dati presentati nella Tabella 1. È possibile notare che, per facilitare la comprensione, nel software sono presenti delle spiegazioni per il suo corretto utilizzo.



MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC JOURNAL

**NÚCLEO DO CONHECIMENTO**

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR NÚCLEO DO CONHECIMENTO ISSN: 2448-0959

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br>

Figura 3 - Dati della tabella per il progetto

Torques mínimo e máximo:  $T_{min} := 0 \text{ lbf}\cdot\text{in}$        $T_{max} := 2000 \text{ lbf}\cdot\text{in}$ Força pontual P aplicada (caso houver):  $P := 1000 \text{ lbf}$ Força pontual P2 aplicada (caso houver):  $P2 := 0 \text{ lbf}$ Carga distribuída aplicada (caso houver):  $q_0 := 0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ 

Distância entre os Mancais:

$$l1 := 16 \text{ in}$$

Distância do mancal de referência (R1, à esquerda) até a força pontual P aplicada:

$$l2 := 18 \text{ in}$$

Distância do mancal de referência (R1, à esquerda) até o início da carga distribuída aplicada:

$$l3 := 0 \text{ in}$$

Distância do mancal de referência (R1, à esquerda) até o final da carga distribuída aplicada:

$$l4 := 0 \text{ in}$$

Distância do mancal de referência (R1, à esquerda) até a força pontual P2 aplicada:

$$l5 := 0 \text{ in}$$

Comprimento total do Eixo:

$$L := 20 \text{ in}$$

Coeficiente de Segurança do Projeto:

$$Nf := 2$$

Tipo de carga aplicada no eixo ( "carga pontual após ultimo apoio" , "carga distribuída linearmente entre apoios" , "carga intermediária entre apoios" , "carga distribuída e pontual entre apoios" , "carga distribuída entre apoios com carga pontual após o ultimo apoio" , "carga pontual entre apoios com carga pontual após o ultimo apoio" ):

 $Tipo := \text{"carga pontual após ultimo apoio"}$ 

Fonte: Preparato dall'autore (2020).



I dati nulli non interferiscono nei calcoli, perché, una volta automatizzato il programma, il software capisce che si tratta di valori non necessari per risolvere questo problema (punto di carico dopo l'ultimo appoggio). Oltre a questi dati, altri sono importanti per la risoluzione dell'esercizio: riferiti alla fatica. La figura 4 mostra questi valori (in giallo), che a loro volta possono essere modificati anche dall'utente.

Figura 4 - Dati per la fatica

#### **Informações para a Fadiga do Eixo**

Carregamento ("flexão" ou "normal") :  $carr := \text{"flexão"}$

Temperatura (até "550°C"):  $T := 37^{\circ}\text{C}$

Superfície ("retificado", "usinado", "laminado a quente" ou "forjado":  $sup := \text{"usinado"}$

Confiabilidade (de "50%" a "99.9999%"):  $R := 99\%$

Tamanho: Assumindo que o valor do diâmetro está entre 8 a 250mm.

$$C_{tam}(d) := 0.869 d^{-0.097}$$

Tipo de elemento que será acoplado ("mancal de rolos cilíndricos" ou "mancal de esferas"):

$Inclinação_{adm} := \text{"mancal de esferas"}$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

L'ultima informazione "supporto cuscinetti a sfere" non sarà utile in questo esempio, in quanto l'esercizio richiedeva solo il diametro in relazione al carico di fatica e non la correzione con la deflessione ammissibile (correzione in relazione alla geometria). Una nota particolare riguardo l'informazione "Taglia", oltre ad essere non modificabile, è che il programma è stato progettato per dimensionare alberi con diametro fino a 250 mm.

Inoltre, altre due informazioni sono cruciali per i calcoli automatizzati: il materiale e la sua specifica. Per quanto riguarda quest'ultimo, è presente un elenco di



specifiche nel *software* interamente tratto dall'Appendice A del libro di Norton (2013) qui elaborato. Entrambi vengono utilizzati per ottenere, con maggiore precisione, i valori di Carico Massimo a Trazione (Sut) e Resistenza allo Snervamento a Trazione (Sy). Da questi valori l'asse verrà dimensionato secondo il metodo ASME.

Figura 5 - Materiale e specifiche

Material do eixo ("aço", "ferro", "alumínio" e "cobre"): *Material := "aço"*

Especificação do material do eixo: *Especificação := "SAE 1050 normalizado a 1650°F"*

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

Pertanto, il progetto dell'albero è completo per il suo dimensionamento. Il risultato ottenuto è stato:

Figura 6 - Risultato ottenuto dall'Esempio 1

$$d_{fadiga} = 30.2\text{mm} \quad d_{fadiga} = 1.188\text{in}$$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

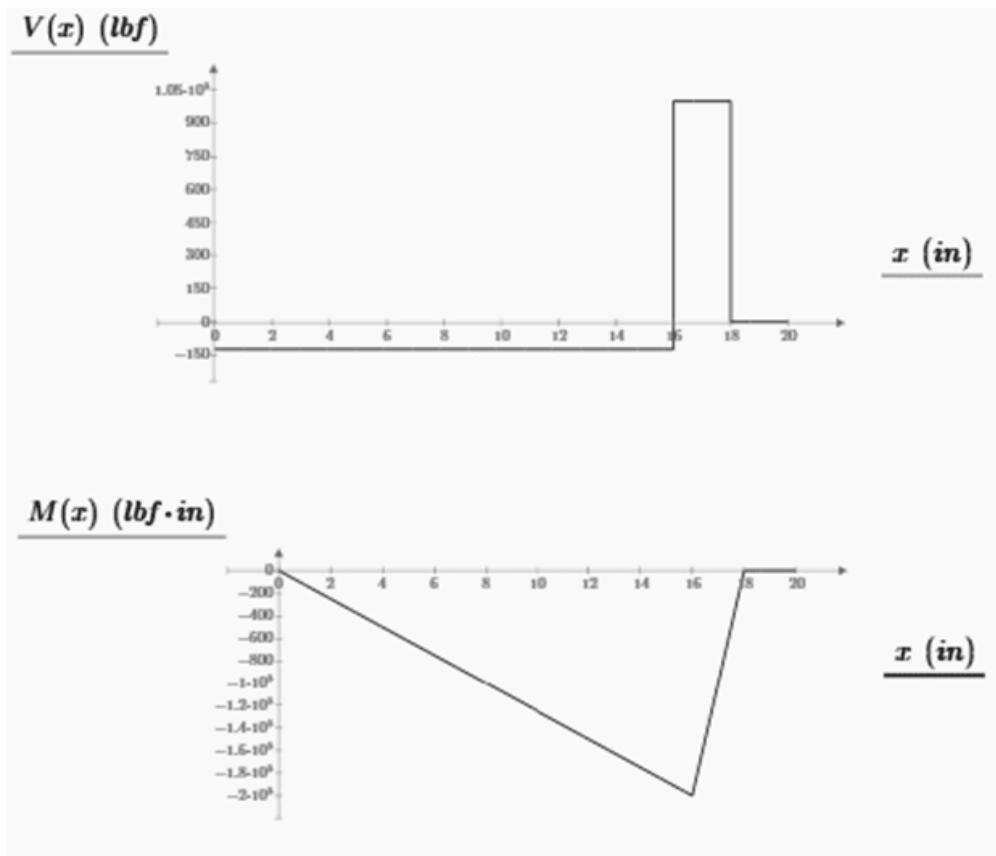
Si può notare che il risultato ottenuto (Figura 6) è stato lo stesso della risposta di Norton, mostrata nella Figura 2. Pertanto, l'automazione del processo di dimensionamento del vano è stata un successo in questo caso.

Come accennato al punto 1, il progetto qui presentato ha anche lo scopo di aiutare in campo accademico. Rendendo giustizia a questa parte, presenta le reazioni vincolari, i diagrammi della forza di taglio (taglio) e del momento flettente interno, il comportamento dell'albero sotto carico alternato, le componenti alternate e medie del momento flettente interno, insieme ai valori dei componenti di coppia alternata e media. La figura 7 presenta i risultati delle reazioni ai supporti e i diagrammi degli sforzi interni dell'esercizio comparativo I.



Figura 7 - Reazioni e diagrammi

$$R2 = (5.004 * 10^3)N \quad R2 = (1.125 * 10^3)lbf \quad R1 = -556.028N \quad R1 = -125lbf$$

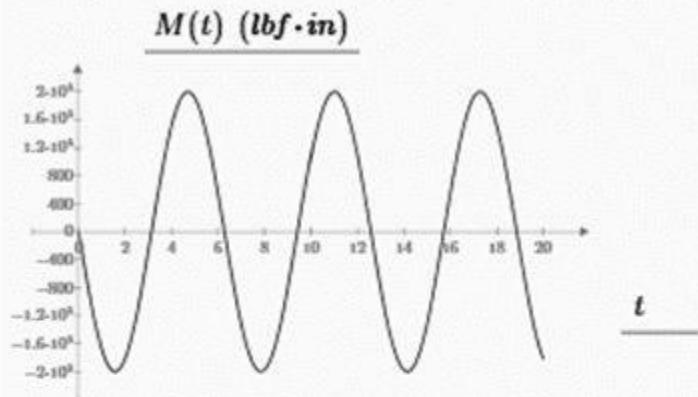


Fonte: Preparato dall'autore (2020).



Figura 8 - Momenti e momenti alternati e medi

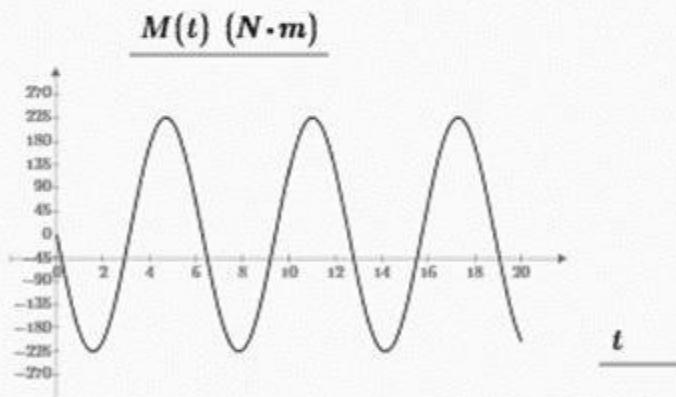
Eixo está girando: Carga Alternada



$$M_a := M_{\max}$$

$$M_a = -2 \cdot 10^3 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_a = -225.97 \text{ N} \cdot \text{m}$$



$$M_m := \frac{|M_{\max}| + M_{\max}}{2}$$

$$M_m = 0 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_m = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_a := \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$$T_a = (1 \cdot 10^3) \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_a = (8.851 \cdot 10^3) \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$T_m := \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

$$T_m = (1 \cdot 10^3) \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_m = (8.851 \cdot 10^3) \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

Il progetto, inoltre, presenta anche i supporti cuscinetti ideali per tale albero, siano essi a rulli autoallineanti o sfere rigide. Tuttavia, in questo esempio comparativo, non viene chiesto altro se non il dimensionamento dell'albero in relazione alla



fatica. Il prossimo esempio riguarderà il progetto del supporto del supporto cuscinetti.

In questo esempio, il *software* è stato effettivamente automatizzato nei suoi calcoli, generando una risposta identica a quella trovata nel lavoro di Norton (2013), *Projeto de Máquina: Uma abordagem integrada*.

### **3.2 PROBLEMA DEL PROGETTO 2**

Questo problema è una continuazione del precedente, dove ora è richiesta la scelta del supporto cuscinetti radiale a sfere. La dichiarazione dell'esercizio è la seguente:

Figura 9 – Problema 2

**II-1** O eixo mostrado na Figura P11-1 foi projetado no Problema 10-1. Para o(s) dado(s) na(s) linha(s) assinalada(s) da Tabela P11-1 e para o diâmetro correspondente do eixo encontrado no Problema 10-1, projete mancais convenientes para suportar a carga por pelo menos  $7E7$  ciclos a 1500 rpm. Escreva todas as hipóteses. Usando mancais de esferas de ranhura profunda com 10% de taxa de falha.

Fonte: adattato da Norton (2013).

La risposta di Norton (2013) al problema progettuale in questione presenta due diversi supporto cuscinetti. Tuttavia, per la conformità, il *software* di progettazione ne sceglierà solo uno, che sarà il supporto cuscinetti che supporta il carico maggiore. Nel problema, l'supporto cuscinetti che subisce lo sforzo maggiore è quello sotto l'appoggio della reazione 2 (R2), come si può vedere in figura 7 per il maggior valore di reazione. Nella Figura 10 c'è la risposta al Problema 2 (in verde).



MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC JOURNAL

**NÚCLEO DO CONHECIMENTO**

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR NÚCLEO DO CONHECIMENTO ISSN: 2448-0959

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br>

Figura 10 – Risposta al secondo esercizio

11-1 #6300 na extremidade esquerda da  $1,4E9$  ciclos  $L_{10}$  de vida no mancal da esquerda e mancal #6306 na extremidade esquerda da  $8,8E7$  ciclos  $L_{10}$  de vida no mancal direito.

Fonte: adattato da Norton (2013).

Per automatizzare il progetto, è necessario includere le seguenti informazioni, mostrate in Figura 1:

Figura 11 - Dati del problema per il supporto cuscinetti

### Mancais

Vida para os Mancais em horas ou em ciclos (escrever o valor em um e deixar o outro igual a 0):

$$L_{10h} := 0 \text{ hr}$$

$$Ciclos := 7 \cdot 10^7$$

Rotação do Eixo em rpm:

$$nt := 1500 \text{ rpm}$$

Tipo de Mancal ("autocompensador de rolos" ou "rigido de esferas"):

*Mancal := "rígido de esferas"*

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

Il software ammette l'inserimento in ore e numero di cicli per la vita del supporto cuscinetti, in questo modo si possono realizzare progetti che hanno un dato o l'altro. La risposta ricevuta è stata:

Figura 10 - Risultato del supporto cuscinetti a sfere ottenuto dall'Esempio 2

$$d_{esferas} = 35\text{mm} \quad d_{esferas} = 1.378\text{in} \quad \text{Modelo}_{SKF} = "6407"$$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).



Si noti che la risposta non era la stessa e che il valore del diametro dell'albero è diverso. Le ragioni di queste differenze sono l'idoneità e la sicurezza. I supporto cuscinetti presenti nel catalogo del produttore SKF hanno diametri specifici per ogni carico, dinamico o statico. Pertanto, è stato necessario eseguire un arrotondamento automatico all'interno del programma per adattarsi ai tipi di supporto cuscinetti presenti. E, per motivi di sicurezza, l'arrotondamento è stato effettuato nel seguente modo: approssimando ogni 5 mm. Usando questo esercizio come esempio, il valore del diametro era 30,2 mm, quindi il suo valore arrotondato è 35 mm.

Pertanto, il risultato ottenuto è stato diverso, poiché il risultato di Norton (2013) non ha questo tipo di arrotondamento. Tuttavia, la risposta può essere considerata affidabile, poiché è stato presentato un supporto cuscinetti equivalente al nuovo diametro, più grande e più resistente del minimo necessario per la fatica.

Ai fini della progettazione, il software presenta anche l'opzione equivalente di un supporto cuscinetti orientabile a rulli. Passando da "rigido a sfere" a "rulli autoallineanti" come mostrato nella Figura 9, il programma visualizza il supporto cuscinetti dal rispettivo catalogo SKF.

Figura 12 - Risultato del supporto cuscinetti a rulli ottenuto dall'Esempio 2

$$d_{rolos} = 40\text{mm} \quad d_{rolos} = 1.575\text{in} \quad \text{Modelo}_{SKF} = "21308CC"$$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

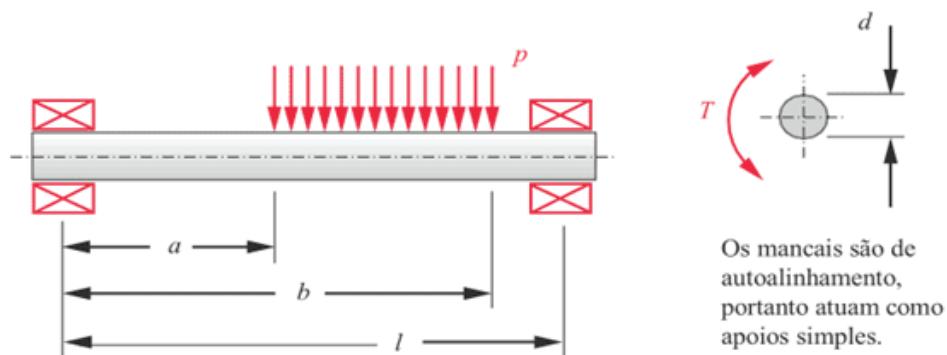
Questa opzione non si trova nelle risposte di Norton (2013) in modo da poter effettuare un confronto. Tuttavia, per i calcoli sono state utilizzate le specifiche di entrambi i cataloghi, in modo automatizzato. La risposta ha variato la dimensione dell'albero anche in questa configurazione, poiché i tipi di supporto cuscinetti hanno diverse categorie e formulazioni per adottarne una per un progetto.



### 3.3 PROBLEMA DEL PROGETTO 3

L'esercizio seguente è un problema di progettazione in cui un albero semplicemente supportato subisce un carico distribuito linearmente tra i suoi supporti.

Figura 13 - Problema 3



\*10-2 Um eixo biapoiado é mostrado na Figura P10-2. Uma carga distribuída de magnitude constante unitária  $p$  é aplicada enquanto o eixo roda sujeito a um torque variável com o tempo que varia de  $T_{min}$  a  $T_{max}$ . Para os valores na(s) linha(s) assinalada(s) na Tabela P10-1, encontre o diâmetro do eixo requerido para obter um coeficiente de segurança 2 no carregamento de fadiga se o eixo é de aço de  $S_u = 745$  Mpa e  $S_y = 427$  Mpa. As dimensões são em cm, a força distribuída em N/cm e o torque em N-m. Pressuponha a ausência de concentrações de tensão.

Fonte: adattato da Norton (2013).

La tabella citata nella dichiarazione è la stessa della tabella 1 utilizzata nel primo esempio. La risposta trovata nella dispensa è:

Figura 14 – Risposta al terzo esercizio

10-2 Fila (a)  $d = 48,6$  mm, suposto usinado, 99% de confiabilidade e 30°C.

Fonte: Norton (2013).



Dopo aver modificato i dati iniziali, mostrati in Figura 3, e cambiato anche l'unità di misura dal Sistema Inglese al Sistema Internazionale, il risultato ottenuto è stato:

Figura 15 - Risultato ottenuto dall'Esempio 3

$$d_{fadiga} = 48.1\text{mm} \quad d_{fadiga} = 1.892\text{in}$$

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

Si può notare che il risultato è stato diverso dalla risposta di Norton (2013). Il programma sviluppato per automatizzare il dimensionamento degli assi presenta una leggera variazione rispetto a quello reale. La tabella 2 presenta quantitativamente gli errori calcolati confrontando i valori ottenuti dal progetto con quelli del sito *Wolfram Alpha*, poiché i loro risultati sono gli stessi di quelli trovati nel libro *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada* (NORTON, 2013), utilizzato qui come base.



Tabella 2 - Errori previsti nel progetto

Valores (U1,U2)	Projeto	Wolfram (real)	Erro
(570 ; 287)	9,535	9,999	4,64%
(80 ; 50)	5,084	5,24	2,98%
(10 ; 8)	2,629	2,668	1,46%
(5,569 ; 3,809)	2,116	2,14	1,12%
(4,5 ; 2,5)	1,92	1,939	0,98%
(3,805 ; 1,234)	1,722	1,737	0,86%
(2,654 ; 1,1)	1,56	1,57	0,64%
(2,589 ; 3,57)	1,837	1,848	0,60%
(2,5 ; 2,5)	1,715	1,725	0,58%
(1 ; 2)	1,445	1,448	0,21%
(1,487 ; 0,163)	1,188	1,188	0,00%
(0,85 ; 0,25)	1,037	1,033	-0,39%

Fonte: Preparato dall'autore (2020).

I valori denominati U1 e U2 sono i valori delle unità indicate nel programma per il calcolo del diametro dell'albero. Si noti che maggiori sono i valori di queste unità, maggiore è l'errore previsto. Poiché il progetto in questione calcola un albero fino a 10 pollici, o 250 mm, l'errore più grande riscontrato è nella parte superiore del telaio (4,64%). In verde è il motivo per cui l'Esempio 1 ha lo stesso risultato di quello reale, avendo questi esatti valori di U1 e U2, il cui errore è pari allo 0%. In giallo, si trova l'intervallo di errore dell'Esempio 3 qui presentato. Nel progetto il valore di U1 era 3.235 e U2 pari a 1.447, entrambi in pollici cubi.

Pertanto, l'errore della risposta nell'Esempio 3 era di circa l'1%, equivalente a 0,5 mm in questo esercizio. Questo errore non si rivela catastrofico, perché, come mostrato nell'Esempio 2, il diametro dell'albero sarà arrotondato al successivo multiplo unitario di 5 per ragioni di adeguatezza e sicurezza. Cioè, sia per la



risposta Norton (48,6 mm), il cui valore è esatto e non ha alcuna regolazione, sia per il risultato del programma (48,1 mm), il valore sarà di 50 mm.

Tuttavia, per errori superiori al 3%, il programma si adatterà per aggiungere altri 5 mm. Questo perché, osservando il valore segnato in viola nella Tabella 2, l'errore finisce per essere di circa 4 mm, e non superiore a 0,5 mm come visto nell'esempio del paragrafo precedente. E, per errori superiori al 4%, nella fascia rossa verranno aggiunti 12 mm, poiché gli errori possono variare fino a questo valore. Ad esempio, l'asse considerato come reale nell'intervallo rosso è di circa 10 pollici (250 mm) con un errore del 4,65%. Pertanto, il programma automatizzato risulterà in un valore inferiore di 0,464 pollici (11,8 mm). Sommando il valore di 12 mm, questo valore sarebbe più vicino al valore reale e, per altre dimensioni leggermente inferiori, ma con un errore comunque superiore al 4%, il dimensionamento sarebbe maggiore, aumentando così la sicurezza del progetto.

Vale la pena ricordare che, dopo l'addizione, il valore ottenuto sarà arrotondato al multiplo successivo di 5. Quindi, sempre usando la fascia rossa come esempio, l'asse del Progetto era di 9,535 pollici, ovvero 242,2 mm. Aggiungendo altri 12 mm, il risultato è 254,2 mm e, arrotondando, il risultato finale è 260 mm. Quest'ultimo valore è il valore massimo del diametro che il programma deve adottare per un supporto cuscinetti volvente. Se il carico statico o dinamico richiede un diametro maggiore per adattarsi a un supporto cuscinetti, il programma risponderà con un messaggio "Adotta un altro materiale", poiché il valore massimo è 260 mm

Pertanto, il dimensionamento dell'asse è operativo per adattarsi all'ambito accademico e professionale, che opera nel metodo ASME per i calcoli.

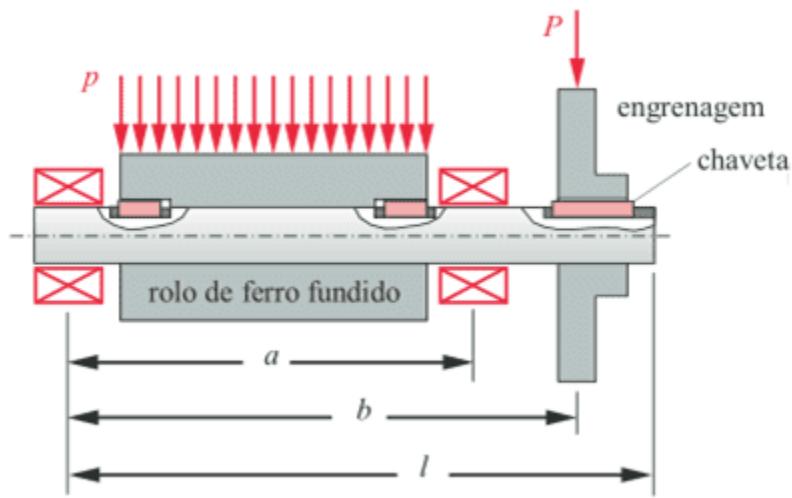
### **3.4 ALTRI TIPI DI PROBLEMI DI PROGETTAZIONE**

Oltre ai problemi sopra presentati, il progetto è stato programmato anche per risolvere i seguenti casi:



Carico distribuito tra gli appoggi con carico puntuale dopo l'ultimo appoggio;

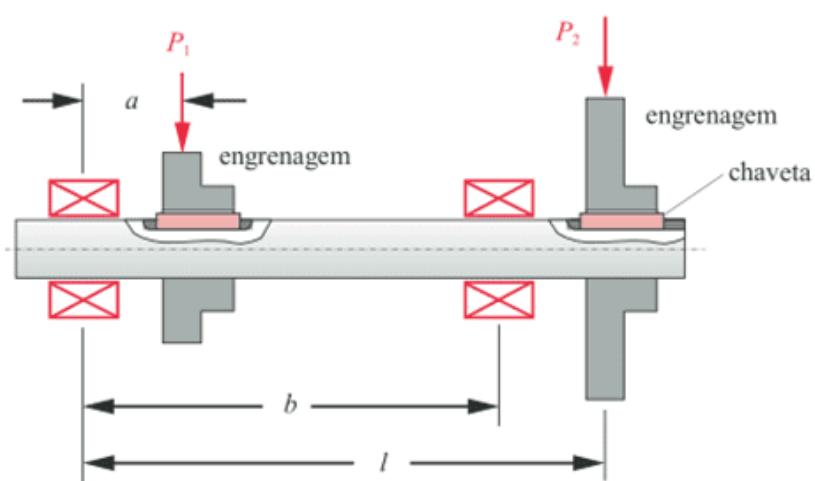
Figura 16 - Rullo azionato da ingranaggio



Fonte: adattato da Norton (2013).

Carico puntuale tra appoggi con carico puntuale dopo l'ultimo appoggio;

Figura 17 - Ingranaggi su un albero comune



Fonte: adattato da Norton (2013).



Carico intermedio tra i supporti, che sarebbe simile alla Figura 17 senza il secondo ingranaggio con il carico denominato P2;

Carico distribuito e puntuale tra i supporti, che a sua volta, analogamente, sarebbe come se l'ingranaggio di figura 16 si trovasse nello stesso spazio del rullo.

Pertanto, il programma sviluppato è in grado di risolvere sei tipi di problemi di progettazione. Vale la pena ricordare che i diagrammi degli sforzi richiedenti sono presentati per tutti, con l'obiettivo di comprendere nell'ottenere le risposte nell'ambiente accademico.

#### 4. CONCLUSIONE

Il progetto sviluppato e qui presentato ha l'obiettivo di ottimizzare il processo di dimensionamento dell'albero, facendo in modo che un *software* esegua i calcoli in modo automatizzato.

Si è dimostrato efficace per ottenere il diametro di un albero in relazione alla fatica e alla sicurezza nei punti 3.1. e 3.2. Al punto 3.3. gli errori sono stati presentati insieme alle loro correzioni all'interno del programma.

Nel programma sono presenti dei calcoli che rappresentano la correzione di questo primo diametro in relazione ad un fattore geometrico. Questo, a sua volta, non è stato richiesto negli esempi su cui si è lavorato al punto 3, avendo esempi nel lavoro Mechanical Engineering Project (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). Gli esempi tratti da un libro di questo tipo non sono stati utilizzati poiché, poiché i calcoli e i valori tabulati, come le tensioni di rottura, sono basati su *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada* (NORTON, 2013), i risultati non sarebbero stati gli stessi.

Inoltre, il programma contiene le correzioni necessarie per quanto riguarda l'esistenza di una chiavette e in relazione a un supporto cuscinetti volvente, come



mostrato nell'esempio del punto 3.2. Sottolineando qui che il limite massimo di un design dell'albero qui è di 250 mm.

L'utilizzo del software *Mathcad Prime* 5.0 ha consentito l'automazione di tutti i processi citati nei paragrafi precedenti. Inoltre, ha presentato i diagrammi e i loro risultati in modo che serva sia per un'industria di produzione di assali sia per la comprensione degli studenti dei corsi di ingegneria meccanica.

Infine, il programma sviluppato si è rivelato un successo per diversi progetti meccanici che dipendono da una parte chiave. Come afferma Norton (2013), tutte le macchine che operano con movimenti rotatori hanno questo componente per il loro funzionamento. Questa parte è essenziale per la manutenzione e l'evoluzione di innumerevoli attrezzi e macchinari in tutto il mondo: l'assale.

## RIFERIMENTI

COLLINS, J. A. Projeto mecânico de elementos de máquinas: Uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 740 p.

DAMAS, L. Linguagem C. 10.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 410p.

FERREIRA, S.E.; CAMPOS, F.O.; DIAS, A.O. Softwares em ambientes educacionais. 2017. 8f. Artigo do Depto. De Computação da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) – Campus de Alto Araguaia, Mato Grosso, 2017.

HIBBELER, R.C. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 641 p.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. Fundamentos do projeto de componentes de máquinas. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 500 p.

SOUZA, E. D. D. Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço ASTM A743 CA6NM. 2011. 32f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NIEMANN, G. Elementos de máquinas. São Paulo: Edgar Blücher, 1971. 184 p.



NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1056 p.

PINHEIRO, V.; NOGUEIRA, L. M.; COSTA, A. L. M. Algoritmo para análise gráfica e dimensionamento de eixos de transmissão de potência. 2014. 8f. Trabalho para XIV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial – FENEMI, Salvador, 2014.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.

WOLFRAMALPHA. Computational intelligence. Disponível em: <<https://www.wolframalpha.com/>> Acesso em: 10 set. 2020.

Spedito: Gennaio 2021.

Approvato: Maggio 2022.

---

<sup>1</sup> Laurea in Ingegneria Meccanica.

<sup>2</sup> Consulente.