

DIFFERENZIALI AUTOMOBILISTICI

FRANCESCO BUCCHI



Dispensa del Corso di Costruzioni Automobilistiche - Università di Pisa
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Veicoli – Version 1.0

NOTA PER GLI STUDENTI

Queste dispense sono il frutto di un lavoro iniziato circa 15 anni fa dai proff. Vitale e Frendo e proseguito poi nel corso dei vari A.A. con l'intento di fornire agli allievi del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Veicoli dell'Università di Pisa un preciso punto di riferimento per l'insegnamento di *Costruzioni Automobilistiche*. Le dispense sono state realizzate seguendo il programma del corso, presentando gli stessi argomenti e concetti esposti a lezione ed inserendo alcuni approfondimenti. Si fa osservare che il presente lavoro non possa ancora ritenersi completo, vi invitiamo quindi a segnalare eventuali errori, fornire suggerimenti o porre quesiti per il miglioramento del materiale didattico presentato nella dispensa, ringraziando anticipatamente tutti coloro che contribuiranno a migliorarne la qualità. Molte parti di questa dispensa sono tratte dalla Tesi di Laurea Magistrale "Analisi di alcune tipologie di differenziali autobloccanti e loro effetti sulla dinamica del veicolo" di Giordano Greco, relatori prof. Guiggiani, prof. Frendo, Ing. Ricci (CRF) cui vanno i miei ringraziamenti.

CONTENTS

1	TIPOLOGIE PIÙ COMUNI DI DIFFERENZIALI	1
2	EQUAZIONI COSTITUTIVE DEL DIFFERENZIALE	3
2.1	Differenziali autobloccanti o a scorrimento limitato . . .	6
2.1.1	Differenziale autobloccante con giunto viscoso Ferguson	8
2.1.2	Differenziali autobloccante a lamelle	11

LIST OF FIGURES

Figure 1	Schema costruttivo di un differenziale aperto .	3
Figure 2	Schema di una trasmissione per veicolo a trazione anteriore con motore trasversale.	3
Figure 3	Schema di funzionamento di un differenziale aperto. Tutte le coppie e le velocità sono assunte positive se dirette come rappresentato in alto nella figura.	4
Figure 4	Equilibrio delle coppie esterne agenti su un differenziale.	7
Figure 5	Equilibrio dei singoli componenti di un differenziale.	7
Figure 6	Schema di un differenziale con giunto viscoso Ferguson.	9
Figure 7	Coppia di attrito viscoso in funzione della differenza di velocità per un differenziale dotato di giunto viscoso Ferguson.	10
Figure 8	Schema di un differenziale precaricato a lamelle.	12
Figure 9	Caratteristica di un differenziale precaricato a lamelle.	12
Figure 10	Funzione coefficiente di attrito.	13
Figure 11	Funzione coefficiente di attrito ideale (tratteggiato) e "rilassata" (tratto continuo).	13
Figure 12	Schema di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc.	14
Figure 13	Disegno esploso di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc.	14
Figure 14	Schema di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc con molle di precarico.	15
Figure 15	Massima coppia di attrito in funzione della coppia agente sulla cassa.	15
Figure 16	Differenziale a lamelle con molla di precarico "a S" tra i pignoni di uscita.	16
Figure 17	Differenziale a lamelle con molla di precarico elicoidale tra i pignoni di uscita	17
Figure 18	Schema di un differenziale ZF (con rampe). . .	18
Figure 19	Esploso di un differenziale con rampe (con rampe). .	19
Figure 20	Disegno tecnico di un differenziale (con rampe).	19
Figure 21	Torsen 1.	20
Figure 22	Torsen 2.	20

TIPOLOGIE PIÙ COMUNI DI DIFFERENZIALI

Il differenziale ha il compito di ricevere dal cambio la potenza in uscita e ripartirla tra le due ruote motrici di uno stesso assale, o, nel caso dei veicoli a trazione integrale, il differenziale centrale ripartisce la potenza ai due alberi che portano il moto all'assale anteriore e all'assale posteriore. Inoltre, il differenziale permette ai due alberi condotti di poter ruotare a velocità diverse in determinate condizioni d'uso. In particolare, in curva, la ruota interna e la ruota esterna percorrono traiettorie con differente curvatura; considerando la condizione di rotolamento senza strisciamento delle ruote sulla strada, ipotesi valida come condizione limite per accelerazione laterale che tende a 0, è evidente come la velocità angolare della ruota interna debba essere minore rispetto a quella della ruota esterna. Quando invece si ha scorrimento longitudinale del pneumatico, il legame tra la velocità della ruota interna ed esterna non è più dettato da ragioni cinematiche ma di equilibrio dell'intero veicolo e in particolare di equilibrio tra la coppia motrice/frenante agente sulla singola ruota e la coppia resistente agente sulla stessa ruota causata dalle azioni di contatto tra pneumatico e strada. Si può quindi venire a creare una condizione in cui la ruota interna ha una velocità angolare maggiore della ruota esterna (si pensi ad esempio al sollevamento della ruota motrice interna in uscita di curva, quando questa è soggetta ad un dato valore di coppia motrice).

Il comportamento di un differenziale ha poi importanti conseguenze sulla dinamica laterale e sulla dinamica longitudinale di un veicolo. Infatti, le modalità con cui un differenziale ripartisce la coppia motrice tra le due ruote influisce notevolmente sul carattere sovra-sottosterzante del veicolo, e, nel caso di un differenziale montato tra due ruote sterzanti, ha importanti ripercussioni sul *feeling* di sterzo (a causa del braccio a terra laterale, le forze longitudinali tra ruota e strada influiscono sull'equilibrio del sistema di sterzo).

La maggior parte delle autovetture con due ruote motrici attualmente in circolazione è equipaggiata con differenziali di tipo ordinario, cosiddetti aperti o liberi, che in ogni condizione di funzionamento ripartiscono equamente la coppia motrice tra i due alberi di uscita. Questa caratteristica penalizza fortemente la capacità di trazione del veicolo, poiché, se le due ruote motrici si trovano in condizioni di aderenza diverse, la massima forza longitudinale che complessivamente può essere trasmessa a terra è limitata a circa il doppio della massima forza che può trasmettere la ruota con minore aderenza. All'opposto di un differenziale aperto, un differen-

ziale completamente bloccato (chiuso) costringe i due alberi in uscita a ruotare sempre alla stessa velocità ed è in grado di ripartire la coppia motrice in misura differente tra le due ruote. Tale tipo di differenziale garantisce che sulla ruota con aderenza più elevata si scarichi la porzione maggiore di coppia ma ostacola la capacità direzionale del veicolo poiché non permette alle due ruote di avere velocità angolari differenti (condizione necessaria, ad esempio, per avere idealmente rotolamento senza strisciamento in curva, specie per curve strette). I differenziali autobloccanti sono stati appunto sviluppati con lo scopo di superare i limiti propri sia del differenziale aperto che del differenziale bloccato, ovvero di permettere una differente ripartizione della coppia motrice tra le due ruote di uno stesso assale, garantendo però alle ruote stesse di poter ruotare a differenti velocità.

2

EQUAZIONI COSTITUTIVE DEL DIFFERENZIALE

In Fig. 1 è rappresentato lo schema costruttivo di un differenziale di tipo aperto. L'albero 3, su cui è calettata la ruota conica di ingresso

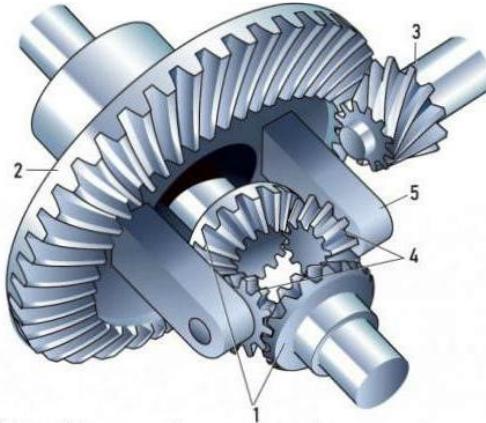


Figure 1: Schema costruttivo di un differenziale aperto

al differenziale, è connesso all'albero di uscita del cambio. Da precisare che, nei veicoli a trazione anteriore, tale ruota non è conica ma cilindrica a denti elicoidali poiché trasmette il moto tra assi paralleli (asse dell'albero secondario del cambio e asse della corona del differenziale), come mostrato in Fig. 2. La ruota 3 ingranà con la corona

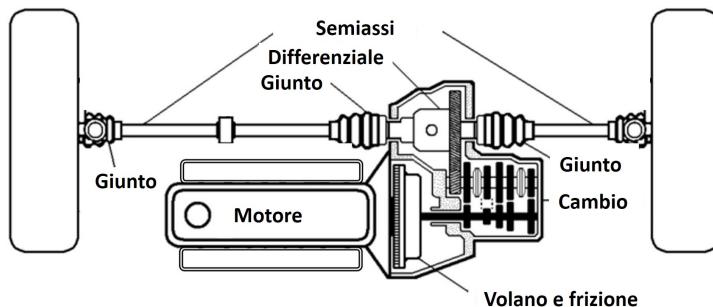


Figure 2: Schema di una trasmissione per veicolo a trazione anteriore con motore trasversale.

del differenziale (2) e il rapporto tra il numero di denti di queste due ruote determina il rapporto di trasmissione del differenziale

$$|\tau_d| = \frac{n_p}{n_c} \quad (1)$$

dove n_c è il numero di denti della corona e n_p il numero di denti del pignone. Sulla corona è fissato il portasatelliti 5, sul quale sono

montati i satelliti (4). Il numero di satelliti è tipicamente compreso tra 2 e 4 e non influisce sulla cinematica del meccanismo, ma semplicemente permette di ripartire su un differente numero di ruote dentate la coppia trasmessa. I satelliti ingranano con i pignoni di uscita 1 che sono connessi ai semiassi (e quindi alle ruote). La connessione tra satelliti e semiassi è ottenuta tipicamente attraverso giunti a tripode o omocinetici.

In Fig. 3 è rappresentato uno schema di funzionamento di un differenziale aperto e sono definite le velocità e le coppie dei singoli elementi. Si fa notare che la velocità angolare della ruota sinistra [destra] è uguale a quella del pignone di uscita sinistro [destro] del differenziale $\omega_{p,s} = \omega_{r,s}$ [$\omega_{p,d} = \omega_{r,d}$], mentre i momenti hanno segno opposto (terzo principio della dinamica) $C_{p,s} = -C_{r,s}$ [$C_{p,d} = -C_{r,d}$]. Applicando la formula di Willis al rotismo epicicloidale composto dal

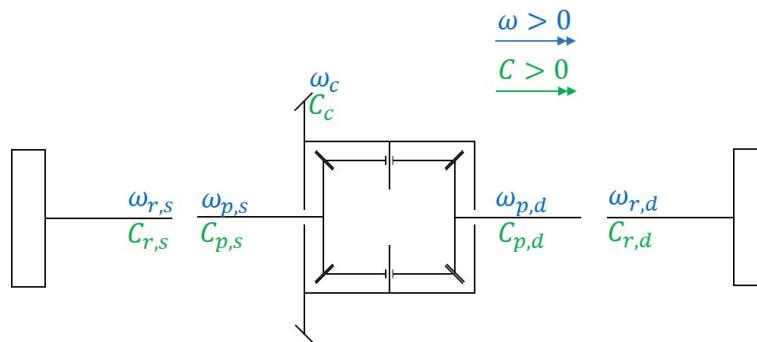


Figure 3: Schema di funzionamento di un differenziale aperto. Tutte le coppie e le velocità sono assunte positive se dirette come rappresentato in alto nella figura.

pignone di uscita 1 (solidale alla ruota sinistra, "r, s"), al portasatellite (solidale alla corona di ingresso e al carter del differenziale, "c") e al pignone di uscita 2 (solidale alla ruota destra, "r, d"), si ottiene il rapporto del rotismo pensato come ordinario

$$\tau_0 = \frac{\omega_{p,s} - \omega_c}{\omega_{p,d} - \omega_c} = -\frac{z_{p,d}}{z_{p,s}} = -1 \quad (2)$$

da cui si ricava la fondamentale relazione

$$\omega_c = \frac{\omega_{p,s} + \omega_{p,d}}{2} \quad (3)$$

ossia la velocità media delle ruote è sempre uguale alla velocità della corona del differenziale. Questa relazione è valida per il differenziale aperto ma continuerà ad esser valida anche per differenziali a scorrimento limitato.

Considerando l'equilibrio a rotazione del differenziale si ha, in condizioni stazionarie,

$$C_c + C_{p,s} + C_{p,d} = 0 \quad (4)$$

mentre, per quanto riguarda il bilancio di potenza

$$C_c \omega_c + C_{p,s} \omega_{p,s} + C_{p,d} \omega_{p,d} = W_{\text{diss}} \quad (5)$$

dove W_{diss} è la potenza dissipata internamente al differenziale (ad es. per attrito). Si fa notare che la potenza dissipata è trascurabile in un differenziale aperto, è nulla in un differenziale bloccato, mentre è maggiore di zero in un differenziale in cui si hanno elementi di attrito interni (coulombiano o viscoso) nel momento in cui si ha differenza di velocità tra le due ruote (condizione di differenziale sbloccato). Mettendo a sistema le tre equazioni si ottiene l'espressione delle coppie $C_{p,s}$ e $C_{p,d}$ che i semiassi esercitano sul differenziale, che risulta uguale e opposta a quella che il differenziale esercita sui semiassi e quindi sulle ruote

$$C_{r,s} = -C_{p,s} = \frac{C_c}{2} - \frac{W_{\text{diss}}}{\omega_{r,s} - \omega_{r,d}} = \frac{C_c - \Delta C}{2} \quad (6)$$

$$C_{r,d} = -C_{p,d} = \frac{C_c}{2} + \frac{W_{\text{diss}}}{\omega_{r,s} - \omega_{r,d}} = \frac{C_c + \Delta C}{2} \quad (7)$$

Si nota pertanto che, nel caso in cui $\omega_{r,s} > \omega_{r,d}$, cioè la ruota sinistra ruota ad una velocità angolare più alta rispetto alla ruota destra, la coppia sulla ruota destra (più lenta) risulta maggiore di quella sulla ruota sinistra $C_{r,d} > C_{r,s}$. Pertanto, quando si ha una dissipazione di energia interna al differenziale, la coppia più alta viene trasmessa alla ruota più lenta.

Per caratterizzare un differenziale è possibile bloccarne la cassa, applicare potenza ad una ruota e misurare la potenza disponibile all'altra ruota; in questo modo è possibile definire il rendimento interno del differenziale $\eta_{d,i}$ come

$$\eta_{d,i} = \left| \frac{C_{r,s} \omega_{r,s}}{C_{r,d} \omega_{r,d}} \right| = \left| -\frac{C_{r,s}}{C_{r,d}} \right| = \frac{C_{r,s}}{C_{r,d}} = \frac{C_c - \Delta C}{C_c + \Delta C} = \frac{1}{TBR} \quad (8)$$

che risulta uguale all'inverso del TBR (*Torque Bias Ratio*) che rappresenta il rapporto tra la massima coppia erogabile alla ruota più lenta rispetto al massima coppia erogabile alla ruota più veloce. Tale rapporto è un parametro costruttivo del differenziale ed è legato alla coppia dissipata dall'attrito coulombiano o viscoso interno (pari a ΔC). Tale rendimento interno non deve essere confuso con il rendimento del differenziale (utilizzato nella sezione relativa ai cambi manuali ??) η_d che risulta pari a

$$\eta_d = \frac{C_{r,s} \omega_{r,s} + C_{r,d} \omega_{r,d}}{C_c \omega_c} \quad (9)$$

Se vogliamo esprimere ΔC in funzione della coppia applicata al carter

Torque Bias Ratio

Coefficiente di bloccaggio.

differenziale C_c otteniamo, manipolando l'Eq. 8

$$\Delta C = \frac{TBR - 1}{TBR + 1} C_c \quad (10)$$

dove la frazione che moltiplica C_c è detta coefficiente di bloccaggio b

$$b = \frac{TBR - 1}{TBR + 1}. \quad (11)$$

Tale rapporto è spesso espresso come percentuale (percentuale di bloccaggio).

La differenza di coppia è idealmente nulla in un differenziale aperto e questa caratteristica è spesso apprezzata in quanto una ripartizione simmetrica della coppia, e quindi delle forze longitudinali che si scambiano nel contatto tra ruote motrici e strada (se l'aderenza è sufficiente), non dà contributi significativi alla nascita di momenti di imbardata, specialmente nel caso di ruote motrici non sterzanti, e non ha dunque effetti sul comportamento direzionale della vettura, sia in fase di accelerazione che di rilascio. Il differenziale open presenta tuttavia un grosso svantaggio: poiché la ripartizione della coppia motrice tra le due ruote di uno stesso assale è simmetrica o quasi (se si considerano i termini inerziali), la capacità di trazione del veicolo è fortemente limitata da quella della ruota con minore aderenza.

Se è presente attrito interno invece, all'aumentare della coppia di attrito, aumenta la differenza tra le coppie trasmesse agli alberi di uscita del differenziale, cioè aumenta la asimmetria nella ripartizione della coppia motrice; nel caso in cui le due ruote si trovino in condizioni di aderenza diverse, la ruota con aderenza più elevata (più lenta) può ricevere dal differenziale una coppia motrice superiore a quella della ruota con minore aderenza. La possibilità di migliorare la trazione di un veicolo, aumentando intenzionalmente la coppia di attrito interno del differenziale, è la ragione che ha spinto verso il progetto dei cosiddetti differenziali autobloccanti; questi differenziali sono infatti caratterizzati dalla presenza di forze di attrito interne molto più elevate di quelle che si trovano normalmente in un differenziale aperto. Le varie tipologie di differenziali autobloccanti rappresentano quindi tutte una evoluzione del differenziale ordinario, e differiscono tra di loro esclusivamente per la particolare soluzione costruttiva adottata allo scopo di incrementare le forze di attrito interne.

2.1 DIFFERENZIALI AUTOBLOCCANTI O A SCORRIMENTO LIMITATO

I differenziali autobloccanti e i differenziali a scorrimento limitato (*Limited Slip Differential*, LSD) sono evoluzioni del differenziale aperto in cui sono inseriti degli elementi interni atti a dissipare, attraverso

azioni di attrito o viscose, energia internamente al differenziale. È importante precisare che per i differenziali a scorrimento limitato basati su azioni di attrito di tipo coulombiano, fintantoché il differenziale si trova ad operare in condizioni di attrito statico, il differenziale si comporta come un assale rigido, con l'unico vincolo che $\omega_{r,s} = \omega_{r,d}$; le coppie risultano pertanto indeterminate finché non è noto lo scorrimento del pneumatico. Quando tali coppie superano il valore della coppia limite che può essere trasmessa per attrito statico il differenziale si sblocca, si ha dissipazione interna di energia e tornano a valere le equazioni sopra introdotte.

In Fig. 4 è rappresentato lo schema di equilibrio dell'intero differenziale e in Fig. 5 è rappresentato l'equilibrio dei singoli componenti di un differenziale autobloccante o a scorrimento limitato nel quale ci sia una coppia C_a che agisce tra la scatola del differenziale e uno dei due pignoni di uscita. Il verso della coppia C_a è scelto supponendo che la ruota sinistra stia ruotando più lenta della ruota destra.

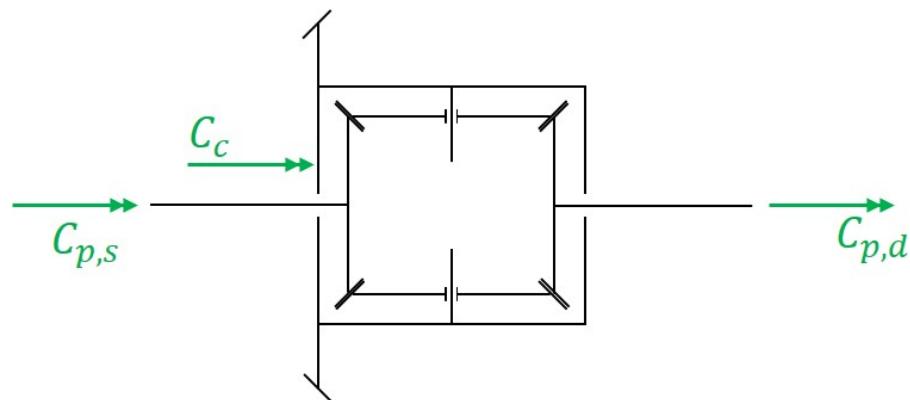


Figure 4: Equilibrio delle coppie esterne agenti su un differenziale.

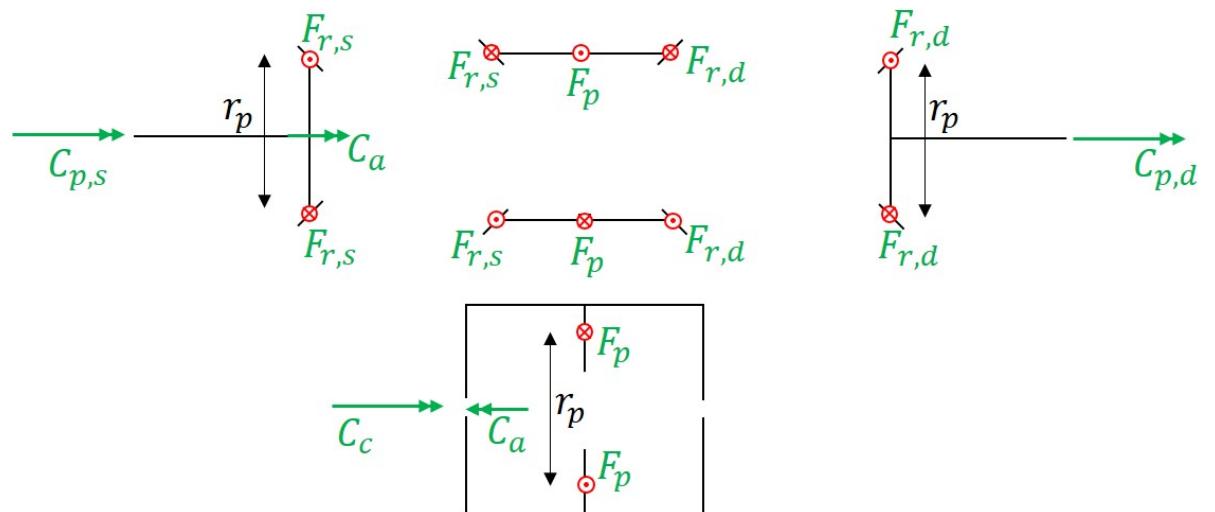


Figure 5: Equilibrio dei singoli componenti di un differenziale.

Partendo dall'equilibrio della cassa si ricava

$$F_p = \frac{C_c - C_a}{2r_p} \quad (12)$$

e, per equilibrio dei satelliti si ottiene

$$F_{rs} = F_{rd} = \frac{F_p}{2} = \frac{C_c - C_a}{4r_p} \quad (13)$$

Considerando l'equilibrio del pignone di uscita sinistro si ottiene

$$C_{ps} + C_a + 2r_p F_{rs} = C_{ps} + C_a + \frac{C_c - C_a}{2} = 0 \quad (14)$$

cioè

$$C_{ps} = -\frac{C_c + C_a}{2} \quad (15)$$

e quindi la coppia alla ruota sinistra risulta

Coppia alla ruota sinistra (più veloce).

$$C_{rs} = \frac{C_c + C_a}{2} \quad (16)$$

Considerando ora l'equilibrio del pignone di uscita destro si ha

$$C_{pd} + 2r_p F_{rd} = C_{pd} + \frac{C_c - C_a}{2} = 0 \quad (17)$$

da cui

$$C_{pd} = -\frac{C_c - C_a}{2} \quad (18)$$

e quindi la coppia alla ruota sinistra risulta

Coppia alla ruota destra (più lenta).

$$C_{rd} = \frac{C_c - C_a}{2} \quad (19)$$

Se l'elemento dissipante (di attrito o viscoso) è interposto tra uno dei due pignoni di uscita e la corona, lo schema di equilibrio è quello appena visto indipendentemente dalla tipologia di elemento dissipante. Si fa notare che, nonostante l'elemento dissipante si interfacci con un solo pignone di uscita, per equilibrio, la coppia da esso prodotta influenza anche l'equilibrio dell'altro pignone di uscita.

2.1.1 Differenziale autobloccante con giunto viscoso Ferguson

I differenziali dotati di giunto viscoso appartengono alla categoria dei cosiddetti differenziali *speed sensitive*, poiché generano una coppia di attrito interna non trascurabile solo nel caso in cui i due alberi di uscita ruotino a velocità diverse; inoltre, la coppia di attrito stessa aumenta all'aumentare della differenza tra le velocità angolari.

Un differenziale autobloccante con giunto viscoso è, dal punto di vista costruttivo, molto simile ad un differenziale aperto. L'effetto autobloccante è ottenuto attraverso una serie di lamelle solidali, a due a due, alla scatola del differenziale e ad uno dei due alberi di uscita (Fig. 6). Tali lamelle sono fisse rispetto alla scatola [al pignone di uscita] non sono precaricate (come invece avviene nei differenziali con lamelle di attrito). Tra le lamelle è presente un meato riempito con un fluido viscoso che aumenta la coppia di attrito viscoso interna al differenziale. La coppia viscosa aumenta (non necessariamente in maniera lineare) all'aumentare degli scorrimeni relativi tra le superfici che racchiudono il fluido stesso, e quindi aumenta all'aumentare della differenza tra le velocità angolari dei due alberi di uscita. La coppia viscosa C_v trasmessa da una serie di lamelle avente N facce affacciate a forma di disco con raggio interno R_i e raggio esterno R_e

$$C_v = N \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^{R_e} \tau_v r^2 dr d\theta = 2N\pi \int_{R_i}^{R_e} \frac{\eta \Delta \omega r}{h} r^2 dr = \frac{N\pi\eta\Delta\omega}{h} \left(\frac{R_e^4 - R_i^4}{2} \right) \quad (20)$$

dove η è la viscosità del fluido (assunta costante), $\Delta\omega$ la differenza di velocità angolare tra i dischi affacciati, h lo spessore del meato di fluido tra due dischi affacciati. Elevate coppie di attrito possono generarsi solo nel caso in cui la differenza tra le velocità angolari delle ruote sia grande (ridurre troppo h porta a problemi tecnologici che potrebbero indurre lo sfregamento tra dischi affacciati), mentre in tutte le altre situazioni il comportamento del differenziale è molto simile a quello di un aperto.

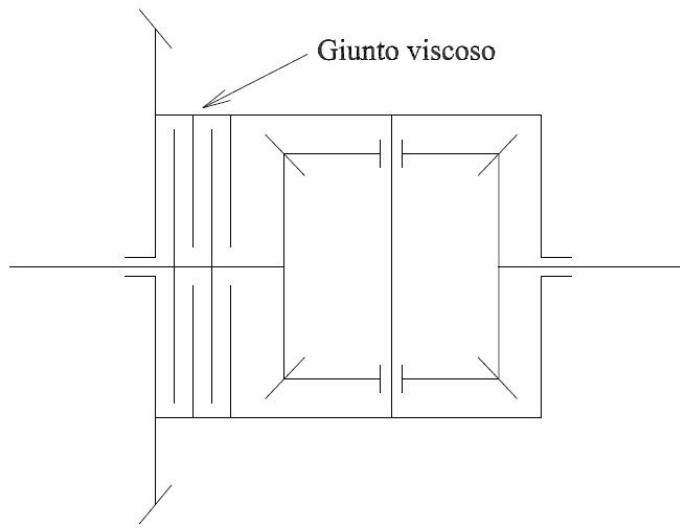


Figure 6: Schema di un differenziale con giunto viscoso Ferguson.

La caratteristica della coppia di attrito interno di un differenziale dotato di giunto viscoso Ferguson è qualitativamente rappresentata in Fig. 7

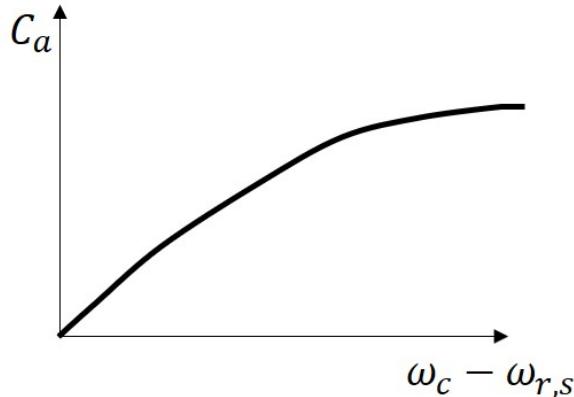


Figure 7: Coppia di attrito viscoso in funzione della differenza di velocità per un differenziale dotato di giunto viscoso Ferguson.

Per piccole differenze di velocità la coppia di attrito viscoso è bassa, per poi aumentare considerevolmente quando questa differenza diventa elevata. Se la differenza aumenta ulteriormente, la coppia C_a tende ad un asintoto orizzontale (*shear-thinning*): è questa la condizione di saturazione del giunto. Questo tipo di comportamento è quello desiderato per un differenziale di questo tipo, nel quale la coppia viscosa non aumenta in maniera divergente. La caratteristica dipende dalla natura del fluido siliconico utilizzato e dalla sua temperatura.

Uno dei difetti di questo tipo di differenziale è legato al fatto che il fluido siliconico utilizzato per generare le azioni viscose aumenta di viscosità all'aumentare della temperatura. Questa caratteristica, instabile poiché l'aumento di coppia dissipata fa aumentare la temperatura che a sua volta fa aumentare la viscosità (*shear-thinning*) e quindi la coppia dissipata, influisce notevolmente sul comportamento del giunto, perché può portare ad una particolare condizione di funzionamento detta *humping* e determinare il completo blocco del differenziale. Infine, in frenata l'azione di un differenziale *speed sensitive* può interferire con quella del sistema ABS.

Tra i vantaggi dell'essere *speed sensitive* pertanto vi è quello che il differenziale si comporta quasi come un differenziale aperto in presenza di piccole differenze tra le velocità delle ruote motrici, come ad esempio accade durante una curva di ampio raggio; in questi casi quindi il differenziale non influenza apprezzabilmente il carattere sovra – sottosterzante del veicolo, e non causa la nascita di copie significative sul volante. Da questo punto di vista, il differenziale dotato di giunto viscoso raggiunge un buon compromesso tra le due opposte esigenze di ogni differenziale autobloccante: la capacità di limitare lo slittamento di una ruota con scarsa aderenza, e la possi-

bilità di garantire differenti velocità per le ruote motrici durante le curve se soggette a differenti coppie resistenti, al di sopra di una certa soglia.

2.1.2 *Differenziali autobloccante a lamelle*

Nei differenziali a lamelle la coppia di attrito interna C_a viene intenzionalmente incrementata attraverso l'impiego di frizioni multidisco posizionate tra la scatola del differenziale e uno o entrambi gli alberi di uscita. È possibile classificare i differenziali che appartengono a questa categoria sulla base del meccanismo che consente la chiusura, totale o parziale, di queste frizioni.

2.1.2.1 *Differenziale precaricato*

I differenziali precaricati utilizzano due frizioni a lamelle disposte ai due lati del differenziale e realizzate alternando tra di loro dischi di frizione torsionalmente solidali all'albero di uscita (rossi in Fig. 8) a dischi torsionalmente solidali al carter del differenziale (neri in Fig. 8). Tutti i dischi possono scorrere lungo l'asse di rotazione del differenziale in quanto sono montati su scanalature ricavate sui due alberi di uscita e sulla scatola. I due pacchi lamellari vengono precaricati utilizzando alcune molle *Belleville* (arancio in figure) che spingono un elemento spigidisco sui dischi di attrito. In questo modo i dischi risultano impacchettati e, a differenza del giunto viscoso, non è presente alcun meato tra di essi. In questo modo i dischi di attrito tendono a mantenere bloccato il differenziale fintantoché non viene superata la coppia di attrito C_a , costante al variare delle condizioni di funzionamento del meccanismo, e proporzionale all'entità del precarico imposto.

La caratteristica qualitativa del differenziale è rappresentata in Fig. 9. Fintantoché non è vinta la coppia di attrito statico pari $k\mu F_0$, con k fattore geometrico e F_0 precarico della molla *Belleville*, il differenziale si comporta come un giunto rigido (differenziale bloccato). Si fa notare che in questa condizione di lavoro i satelliti potrebbero, idealmente, non essere presenti. Quando la coppia dovuta al precarico è superata si ha scorrimento del differenziale e le lamelle si comportano come una frizione multidisco. Si fa notare che in questo caso la coppia disponibile, supponendo $\omega_{r,s} \leq \omega_{r,d}$ alle ruote può essere espressa come

$$C_{rs} \leq \frac{C_c}{2} + C_a \quad (21)$$

$$C_{rd} \leq \frac{C_c}{2} - C_a \quad (22)$$

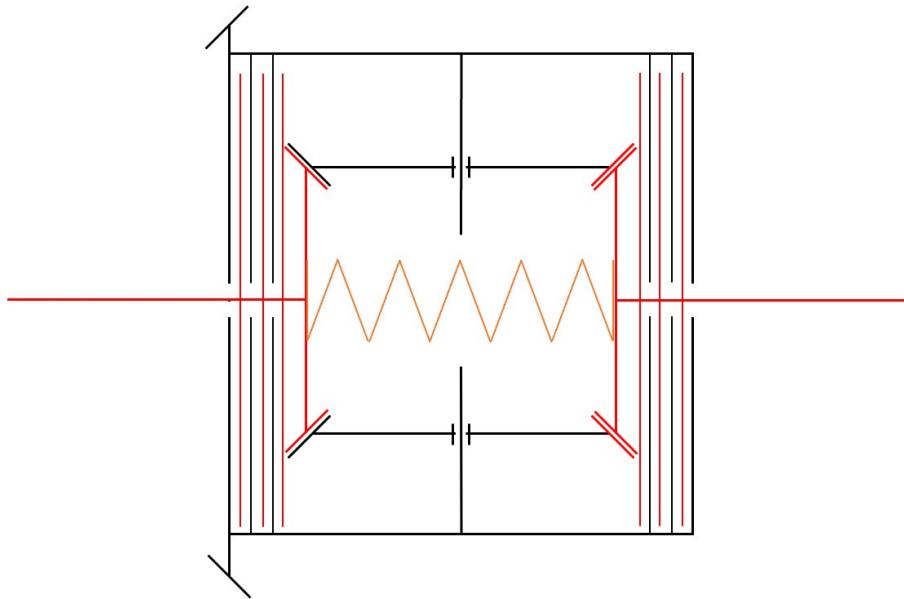


Figure 8: Schema di un differenziale precaricato a lamelle.

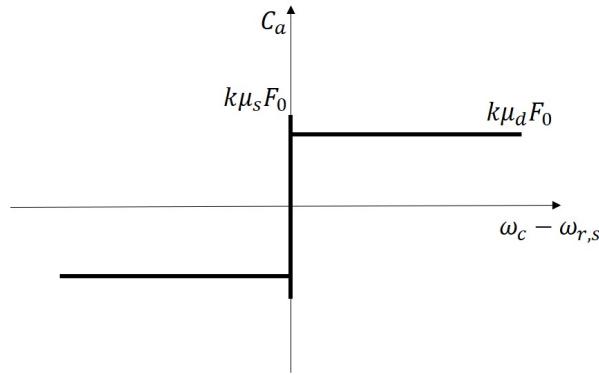


Figure 9: Caratteristica di un differenziale precaricato a lamelle.

dove il segno $<$ vale finché siamo in condizioni di attrito statico; in condizioni di attrito dinamico invece vale l'uguaglianza. A differenza delle analoghe espressioni viste per i differenziali in cui è presente un solo pacco di lamelle, il termine C_a (se riferito alla coppia di attrito di un singolo pacco di lamelle) non è diviso per 2 nell'espressione della coppia.

Se ipotizziamo per semplicità che $\mu_s = \mu_d$ è possibile riscrivere le equazioni di coppia alle ruote come

$$C_{r,s} = \frac{C_c}{2} + f_a(\omega_c - \omega_{r,s})C_a \quad (23)$$

$$C_{r,d} = \frac{C_c}{2} - f_a(\omega_c - \omega_{r,s})C_a \quad (24)$$

dove f_a segue l'andamento rappresentato in Fig. 10. Poiché tale fun-

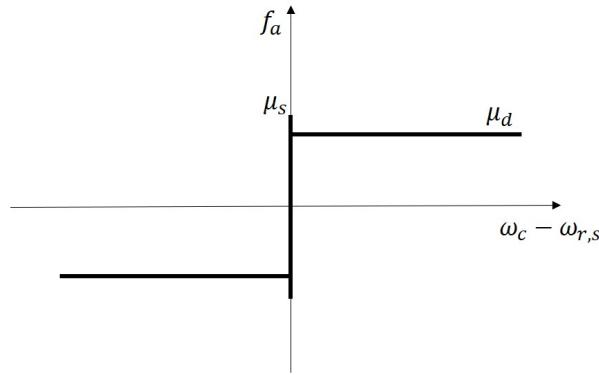


Figure 10: Funzione coefficiente di attrito.

zione non è biunivoca per $\Delta\omega = 0$, è pratica comune nella modellazione "rilassare" tale funzione e considerare la funzione simil-sigmoidale rappresentata a tratto continuo in Fig. 11. In tal modo si ipotizza che sia sempre presente strisciamento tra i dischi impacchettati e si riesce a modellare il comportamento del differenziale senza discontinuità. La pendenza della sigmoide nell'origine è un parametro fondamentale nella modellazione: tanto più questa è elevata tanto più ci si avvicina al comportamento reale del componente ma si rende più *stiff* (numericamente instabile) il sistema di equazioni da risolvere.

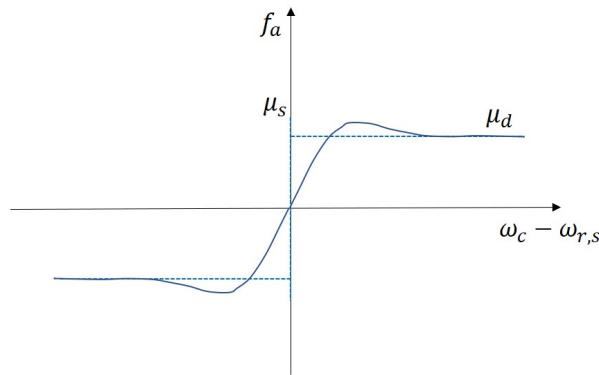


Figure 11: Funzione coefficiente di attrito ideale (tratteggiato) e "rilassata" (tratto continuo).

2.1.2.2 Differenziale a lamelle Dana Trac-Loc

Il differenziale a lamelle Dana Trac-Loc (Fig. 12) è concettualmente molto simile al differenziale precaricato. L'unica differenza sta nel fatto che le lamelle non sono precaricate attraverso delle molle Bellville che spingono tra la cassa e le lamelle stesse, ma l'azione di precarico avviene attraverso la spinta impressa dalle ruote coniche dei pignoni di uscita che sono liberi di scorrere assialmente lungo profili scanalati. In questo modo si ottiene che la coppia di attrito C_a non è costante ma è crescente al crescere della coppia trasmessa. I

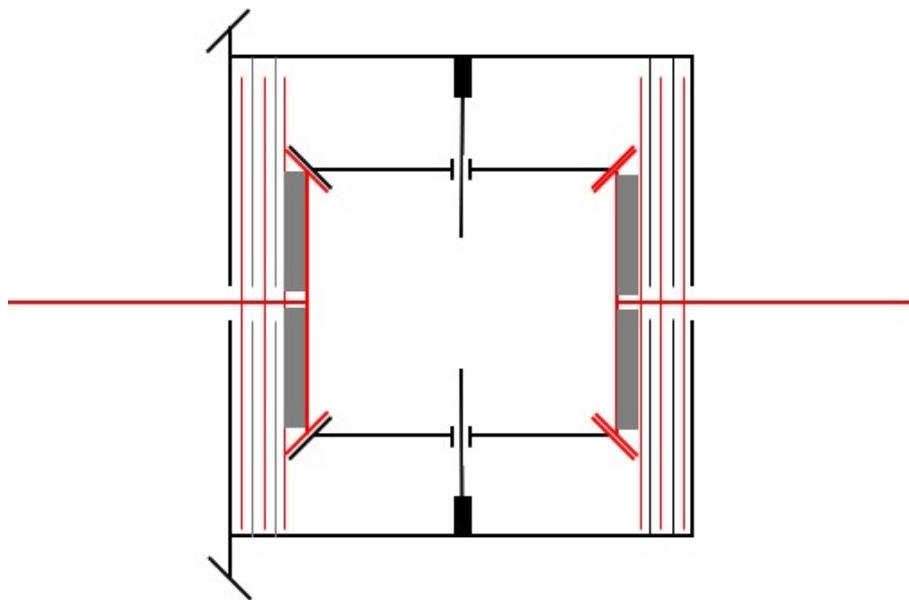


Figure 12: Schema di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc.

I componenti principali di un differenziale Dana Trac-Loc sono riportati nella Fig. 13. Poiché il carter trasmette la coppia in ingresso C_c ai due alberi di uscita attraverso i satelliti, i moduli delle forze di contatto ai denti che i satelliti esercitano sulle due ruote coniche sono proporzionali al modulo della coppia in ingresso al differenziale. In

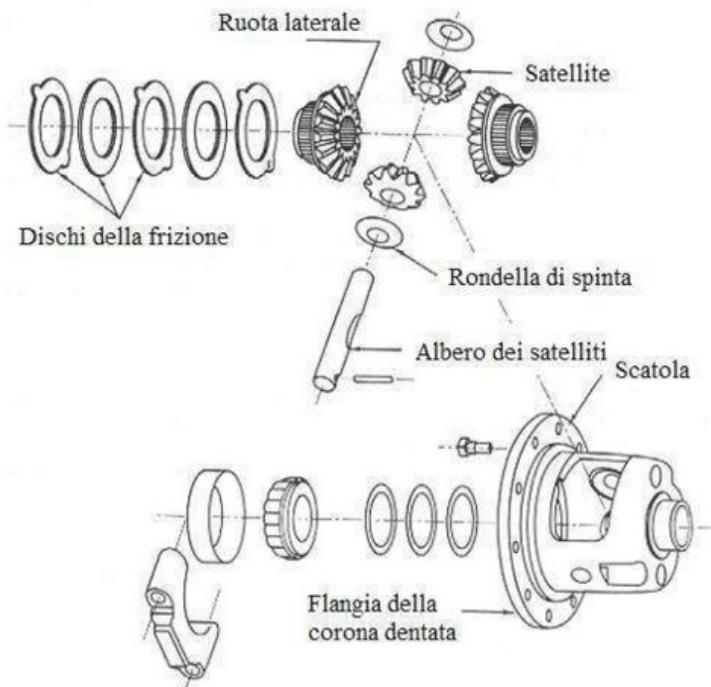


Figure 13: Disegno esploso di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc.

base alla definizione data in precedenza, il coefficiente di bloccaggio,

legato al TBR dall'Eq. 11, si mantiene quindi costante al variare della coppia in ingresso (vedi Fig. 15). Si ricordi che il coefficiente angolare della retta che lega ΔC (o C_a) a C_c è esattamente il coefficiente di bloccaggio (vedi Eq. 11). All'azione bloccante proporzionale alla coppia in ingresso al differenziale può sommarsi quella costante dovuta ad un eventuale precarico. Quest'ultimo può essere generato precaricando le due frizioni attraverso molle Belleville. Utilizzando dette molle, all'aumentare della coppia in ingresso la resistenza che il differenziale oppone allo sblocco resta costante fino a quando la forza di separazione tra ruote coniche e satelliti non uguaglia la forza di precarico delle molle; da questo punto in poi, ogni ulteriore aumento della coppia in ingresso al differenziale fa aumentare la coppia di attrito interna con legge lineare. Da precisare che per quanto riguarda

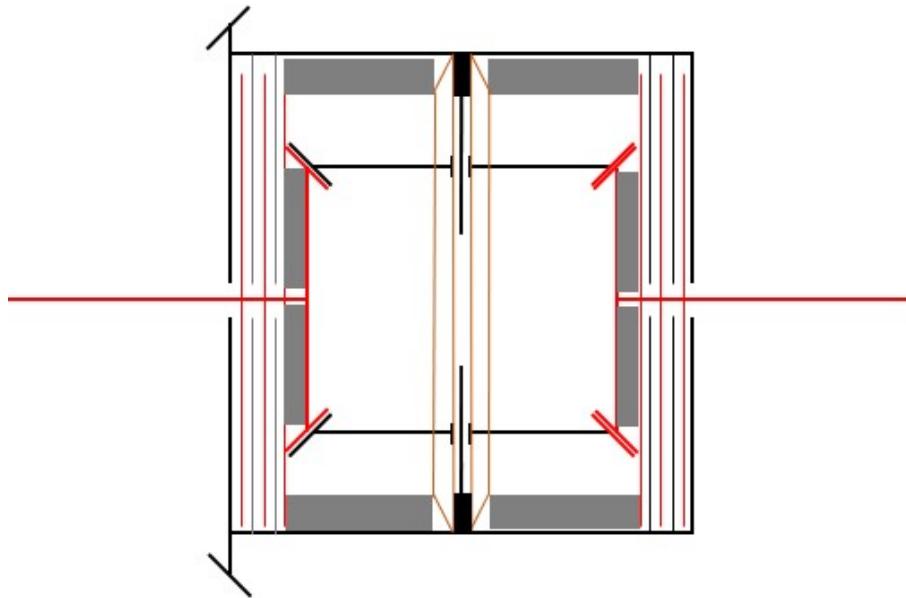


Figure 14: Schema di un differenziale a lamelle Dana Trac-Loc con molle di precarico.

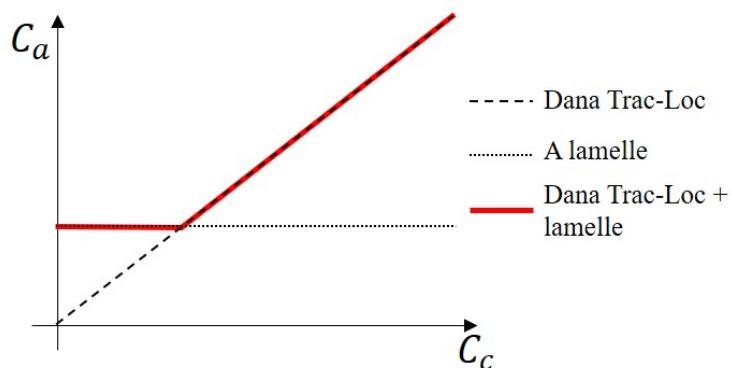


Figure 15: Massima coppia di attrito in funzione della coppia agente sulla cassa.

il passaggio da attrito statico ad attrito dinamico vale quanto già visto per il differenziale a lamelle.

Contrariamente al differenziale dotato di giunto viscoso, il Dana Trac-Loc non genera una coppia di attrito interna proporzionale alla differenza di velocità di rotazione tra i suoi membri, bensì proporzionale alla coppia che il differenziale trasmette globalmente verso l'esterno; il differenziale con giunto viscoso è cioè *speed sensitive*, mentre il Dana Trac-Loc è *torque sensitive*. Durante la frenatura del veicolo, il motore agisce da freno sugli organi della trasmissione, e il cambio applica quindi alla scatola del differenziale una coppia $C_{t extc}$ negativa; l'entità di questa coppia è, in genere, relativamente piccola rispetto alla massima coppia motrice.

In Fig. 16–17 sono presenti le foto di due differenziali a lamelle nelle quali il precarico è ottenuto inserendo delle molle tra i due pignoni di uscita contrapposti.



Figure 16: Differenziale a lamelle con molla di precarico "a S" tra i pignoni di uscita.

2.1.2.3 Differenziale ZF

Un differenziale autobloccante ZF, noto anche con il nome di *Salisbury Axle* è costruttivamente molto simile al differenziale Dana Trac-Loc già studiato; l'unica differenza rispetto a questo sta nel modo con cui vengono generate le forze assiali sulle lamelle di attrito.

Per comprendere come sia possibile la nascita di queste coppie, si faccia riferimento allo schema riportato in Fig. 20. In un differenziale ZF sono presenti le due frizioni già descritte per il differenziale Dana Trac-Loc, ma le due ruote laterali sono bloccate assialmente sui due alberi di uscita. Quindi le frizioni non vengono chiuse dalla componente assiale delle forze di contatto che le ruote laterali scambiano con i satelliti. La scatola è provvista di alcune scanalature dirette

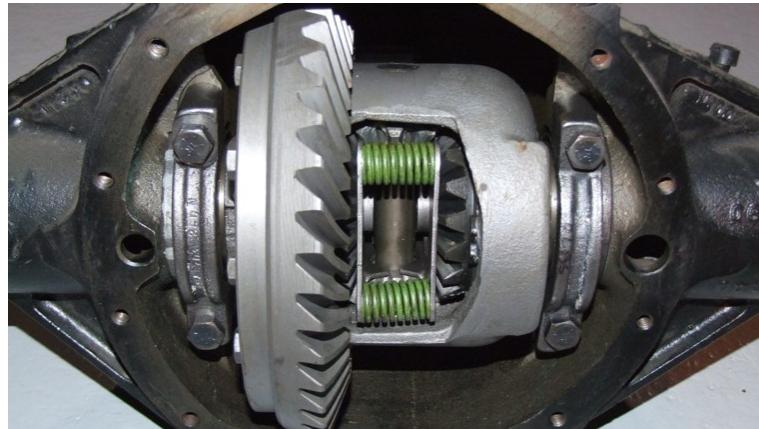


Figure 17: Differenziale a lamelle con molla di precarico elicoidale tra i pignoni di uscita

come l'asse del differenziale, nelle quali alloggiano, tramite opportune alette di trascinamento, due anelli di pressione, e i dischi frizione solidali torsionalmente alla scatola. Le alette di trascinamento permettono quindi il solo movimento assiale. I due satelliti sono montati su un albero, che a sua volta poggia su superfici smussate ricavate per fresatura sui due anelli di pressione (e quindi non sul carter del differenziale come nel differenziale aperto). Grazie all'inclinazione delle superfici smussate degli anelli di pressione, se il cambio applica una coppia C_c al carter del differenziale, sugli anelli nascono delle forze in direzione dell'asse del differenziale che chiudono le due frizioni, ottenendo così l'effetto autobloccante. È poi sempre possibile precaricare le due frizioni, secondo quanto già esposto nel paragrafo precedente.

La caratteristica di coppia di attrito è molto simile a quella già vista per il differenziale Dana Trac-Loc, di cui sfrutta lo stesso principio di funzionamento. Anche in questo caso, la coppia di attrito interna è proporzionale al modulo della coppia che viene trasmessa. Inoltre, nel caso dello ZF, è possibile ottenere due coefficienti di bloccaggio diversi, a seconda del verso del flusso di potenza tra il motore e le ruote. Infatti, conformando diversamente le superfici inclinate (dette rampe) degli anelli di pressione per quel che riguarda la fase di progressione o di rilascio. Inoltre, sostituendo gli anelli di pressione con anelli aventi differenti rampe, è possibile cambiare il TBR del differenziale in maniera rapida. Tale caratteristica è spesso usata sui veicoli da competizione.

2.1.2.4 Differenziale con frizione comandata idraulicaente

In questo caso lo schema è analogo a quello dei differenziali a lamelle già visti ma lo spingidisco è attuato da un attuatore idraulico la cui pressione può essere variata in funzione dei parametri legati alla dinamica del veicolo. Attraverso l'uso di elettrovalvole è possibile da ot-

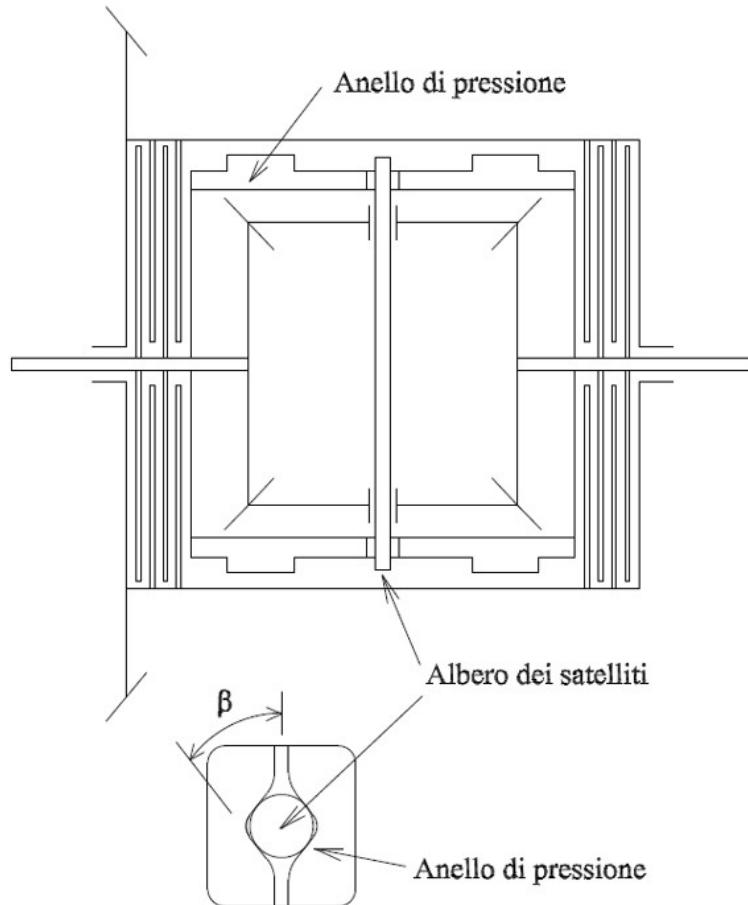


Figure 18: Schema di un differenziale ZF (con rampe).

tenere il trasferimento di coppia ottimale in ogni condizione di funzionamento: modificando l'intensità della forza con cui vengono chiuse le frizioni è possibile infatti modificare il coefficiente di bloccaggio, e far passare il differenziale dalla condizione di open a quella di bloccaggio completo attraverso tutte le possibili condizioni intermedie

2.1.2.5 *Differenziale Torsen*

La geometria di un differenziale Torsen è alquanto diversa da quella dei differenziali analizzati fino a questo momento, che rappresentano tutti una evoluzione del differenziale aperto e ne mantengono interamente la struttura di base. Il Torsen non utilizza infatti il classico schema a ruote coniche del differenziale aperto, ma si basa sull'utilizzo di coppie vite senza fine-ingranaggio elicoidale. I due alberi di uscita terminano ciascuno con una vite senza fine; le due viti sono tra di loro identiche, e sono montate con eliche equiverse. Ciascuna vite ingranà poi con due o tre ingranaggi elicoidali, a seconda dell'impiego cui è destinato il differenziale: nel caso in cui le potenze in gioco siano

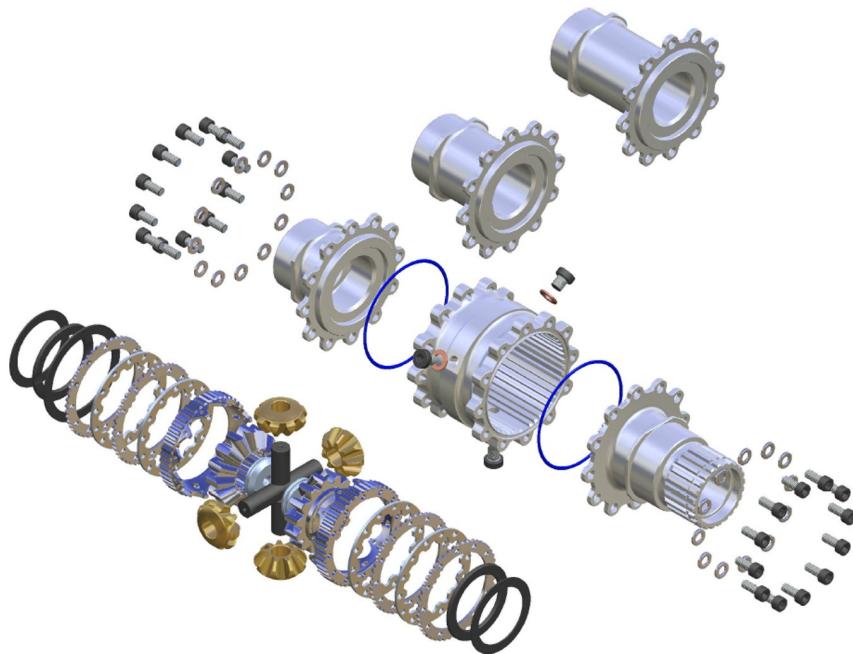


Figure 19: Esploso di un differenziale con rampe (con rampe).

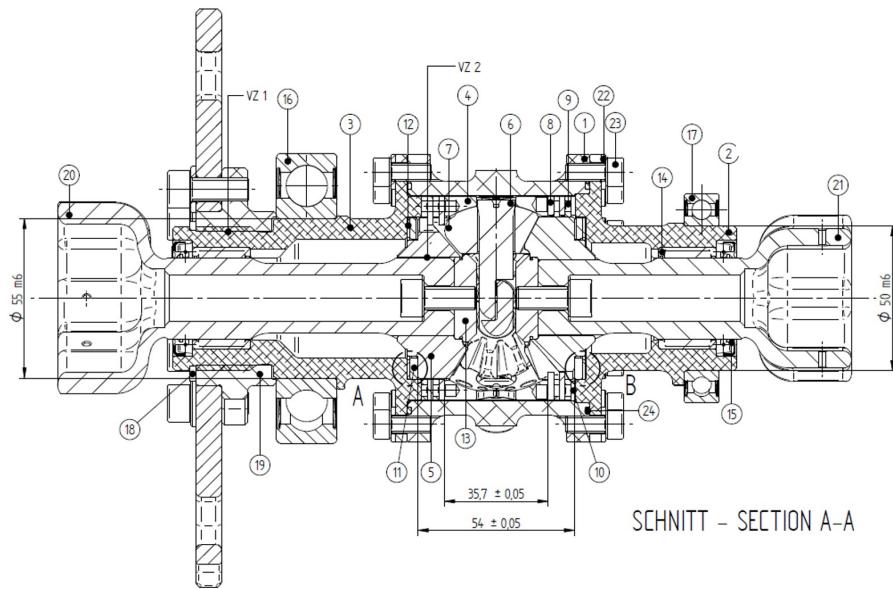


Figure 20: Disegno tecnico di un differenziale (con rampe).

basse, ogni vite ingrana con due ingranaggi diametralmente opposti, mentre nel caso di alte potenze da trasmettere gli ingranaggi in presa con ciascuna vite sono tre, disposti in maniera sfalsata tra di loro a 120 gradi. Gli ingranaggi elicoidali in presa con le viti sono tutti identici, e sono montati su perni collegati alla scatola del differenziale, la quale li porta in rotazione esattamente come accade ai satelliti di



Figure 21: Torsen 1.

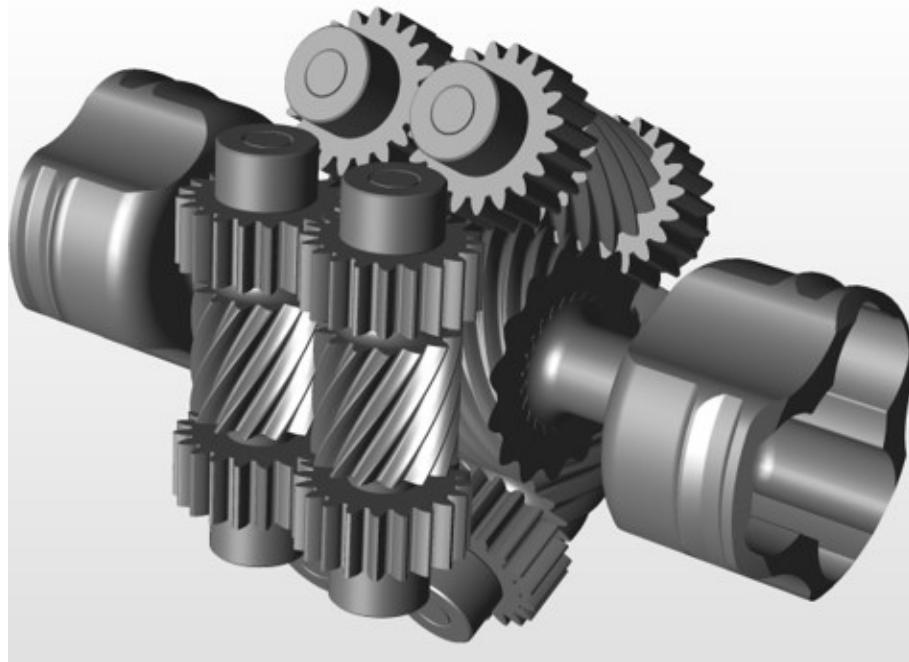


Figure 22: Torsen 2.

un comune differenziale a ruote coniche. Gli ingranaggi in presa con le due viti sono accoppiati tra di loro a due a due con rapporto di trasmissione unitario, attraverso dei pignoncini laterali a denti dritti

ad essi solidali. In questo modo, i due ingranaggi sono costretti ad avere verso di rotazione opposto, ed il rapporto di trasmissione τ_0 del rotismo reso ordinario vale -1, come accade in un differenziale classico. Per capire il funzionamento, supponiamo di tenere il carter fisso e che l'ingresso del moto venga da una delle due viti, l'altra vite deve ruotare con la stessa velocità, ma in verso opposto. Nel differenziale Torsen la coppia di attrito C_a responsabile dell'asimmetria nella ripartizione della coppia motrice viene generata a causa delle azioni di attrito tipiche della coppia vite senza fine-ruota elicoidale; come è noto, il rendimento di questa coppia è infatti notevolmente più basso di quello che normalmente si ottiene con le ruote cilindriche e coniche, a causa delle elevate velocità di strisciamento in corrispondenza del contatto tra i denti.

Poiché le forze di attrito sono direttamente proporzionali al modulo della coppia C_c che viene globalmente trasmessa dal differenziale, anche la coppia di attrito che si oppone alla nascita di una velocità relativa tra i due assali aumenta proporzionalmente all'aumentare della coppia trasmessa, e il rapporto TBR è (circa) costante. Quando il differenziale trasmette piccole potenze, le forze di contatto tra i denti delle viti e i denti degli ingranaggi sono piccole, e il differenziale ha un comportamento molto simile a quello di un open; all'aumentare della coppia trasmessa, i denti vengono serrati tra di loro da forze sempre più grandi, fino ad arrivare al blocco del meccanismo. Anche se basato su uno schema costruttivo ben diverso, il principio di funzionamento del Torsen è quindi assai simile a quello dei differenziali Dana Trac-Loc e ZF: rendendo possibile una differenza tra le coppie trasmesse ai due alberi di uscita, il differenziale può trasmettere una coppia maggiore alla ruota che ha più aderenza, aumentando così la capacità di trazione del veicolo.