



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

Scuola di scienze Mediche e Farmaceutiche

Corso di Laurea in Odontoiatria e Protesi Dentaria

Coordinatore: Chiar.ma Prof.ssa Maria Menini

TESI DI LAUREA

***Espansione mascellare in età adulta con protocolli
differenti: uno studio comparativo 3D***

Relatore:

Professor Marco Migliorati

Correlatore:

Dottoressa Anna De Mari

Candidata:

Alessia Gallo

Anno Accademico 2025/2026

*Ai miei nonni
i timoni della mia nave*

INDICE

SOMMARIO E SCOPO DELLA TESI	1
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE	3
1.1. Cenni di anatomia	3
1.1.1. Osso mascellare.....	3
1.1.2. Anatomia del palato	6
1.1.3. Suture craniche.....	8
1.2. Concetti di crescita e sviluppo.....	13
1.2.1. Sviluppo cranio-facciale.....	13
1.2.2. Principi di crescita	15
1.2.3. Teorie del controllo della crescita	20
1.3. Malocclusioni e problemi ortodontici	22
1.3.1. Normocclusione e Malocclusione.....	22
1.3.2. Eziopatogenesi delle malocclusioni.....	23
1.3.3. Classificazione delle malocclusioni.....	30
1.4. Deficit trasversale del mascellare superiore	36
1.4.1. Definizione e caratteristiche.....	36
1.4.2. Eziologia	37
1.4.3. Diagnosi	39
1.4.4. Discrepanza trasversale e morso incrociato.....	41
1.5. Timing di trattamento e stadio di crescita	44
1.5.1. Timing del trattamento ortodontico	44
1.5.2. Metodi per la valutazione dell'età scheletrica	46
1.6. Espansione mascellare.....	54
1.6.1. Classificazione degli espansori.....	54
1.6.2. Espansori tooth borne e tooth-tissue borne.....	54
1.6.3. Espansori bone borne e tooth-bone borne	57
1.6.4. Corticopunture e corticotomie	76
1.6.5. Espansione mascellare chirurgica	80
CAPITOLO 2 – MATERIALI E METODI.....	85
2.1. Disegno dello studio.....	85
2.2. Popolazione.....	85
2.3. Gruppo 1: MARPE	86
2.4. Gruppo 2: SARPE.....	86
2.5 Gruppo 3: MARPE + Corticopunture	87
2.5. Misurazioni.....	89
2.5.1. Protocollo di misurazione con ITK-Snap	89
2.6 Analisi statistica.....	91
CAPITOLO 3 - RISULTATI.....	92
3.1. Modificazioni scheletriche.....	92
3.2. Modificazioni dento-alveolari	93
CAPITOLO 5 - DISCUSSIONE.....	97
5.1 Interpretazione generale dei risultati	97
5.2 Modificazioni scheletriche.....	98
5.3 Modificazioni della distanza bispinale e significato biologico	99

5.4 Modificazioni dento-alveolari	100
5.5 Significato clinico dei risultati.....	101
5.6 Criticità dello studio.....	103
5.7 punti di forza dello studio	104
5.8 Considerazioni conclusive	105
<i>CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI.....</i>	<i>106</i>
<i>BIBLIOGRAFIA.....</i>	<i>108</i>

SOMMARIO E SCOPO DELLA TESI

Il deficit trasversale del mascellare superiore, o *maxillary transverse deficiency* (MTD) [1], è una condizione clinica caratterizzata da una riduzione della dimensione trasversale del mascellare superiore. Il segno clinico più frequentemente associato a questa alterazione è il crossbite posteriore, che può manifestarsi in forma unilaterale o bilaterale. Tra le altre manifestazioni cliniche più comuni rientrano l'affollamento dentale e la protrusione degli elementi anteriori. Tuttavia, il morso incrociato non è sempre presente: in alcuni pazienti, infatti, un compenso dentale determinato dalla vestibolo-inclinazione dei molari superiori può mascherare il deficit trasversale mascellare. In tali circostanze, nonostante l'assenza di crossbite e un'apparente normalità dell'occlusione posteriore, la larghezza trasversale del mascellare risulta comunque ridotta [1–3]. In presenza di un deficit trasversale del mascellare superiore, il trattamento di scelta consiste nell'espansione scheletrica dell'arcata, finalizzata all'ampliamento del mascellare e all'aumento della distanza transpalatale. La selezione dell'approccio terapeutico più appropriato dipende principalmente dall'età del paziente e dal grado di sviluppo istologico della sutura palatina mediana.

Nei soggetti in crescita, prima che si verifichino l'ossificazione della sutura e il raggiungimento del picco di maturazione scheletrica, è possibile ottenere un'espansione di tipo ortopedico mediante l'espansione rapida del mascellare (*rapid maxillary expansion*, RME) [4,5]. Tale metodica, tuttavia, può risultare poco efficace nei pazienti che hanno superato l'adolescenza o che si trovano in età adulta [6].

Nei pazienti in tarda adolescenza o giovani adulti, l'impiego della RME è associato a diverse limitazioni e possibili complicanze. Tra queste si annoverano una maggiore resistenza all'espansione, un'apertura ridotta o assente della sutura palatina mediana, una prevalenza degli effetti dentoalveolari rispetto a quelli scheletrici, l'inclinazione vestibolare e l'estrusione dei denti posteriori, nonché la comparsa di fenestrazioni e deiscenze ossee, recessioni gengivali e fenomeni di riassorbimento radicolare a carico degli elementi dentari utilizzati come ancoraggio [7–12].

Quando la sutura palatina mediana raggiunge uno stadio di maturazione più avanzato e presenta un numero maggiore di sinostosi, una possibile opzione terapeutica per il trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore è rappresentata dall'espansione palatale rapida chirurgicamente assistita (*surgically assisted rapid palatal expansion*, SARPE). Questa procedura ha l'obiettivo di ridurre la resistenza opposta dalla sutura palatina mediana durante l'espansione, consentendo di ottenere un incremento stabile e duraturo della dimensione trasversale del mascellare e limitando al contempo l'inclinazione dentale [13,14]. L'introduzione dell'ancoraggio scheletrico tramite dispositivi di ancoraggio temporaneo (*temporary anchorage devices*, TADs) ha favorito lo sviluppo di una nuova generazione di apparecchi espansori destinati al trattamento del deficit trasversale mascellare nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata. Le miniviti permettono infatti di trasferire le forze meccaniche direttamente all'osso basale, incrementando gli effetti scheletrici dell'espansione e riducendo quelli indesiderati a livello dentale [12,15–17].

Nel 2007, Wilmes et al. hanno introdotto l'espansore Hybrid Hyrax, caratterizzato dall'impiego di due mini-impianti posizionati nel settore anteriore del palato [18–20]. Successivamente, Garib et al. [21], Lee et al. [22] e Moon et al. [23] hanno proposto un approccio non chirurgico alternativo alla RME basato sull'utilizzo di miniviti, definito *miniscrew-assisted rapid palatal expansion* (MARPE), con l'obiettivo di incrementare il potenziale di espansione scheletrica nei soggetti con maturazione scheletrica avanzata. La MARPE rappresenta una soluzione potenzialmente in grado di ridurre gli effetti collaterali associati all'espansione rapida convenzionale a supporto dentale e costituisce un'alternativa meno invasiva rispetto alla SARPE. Inoltre, consente di massimizzare gli effetti scheletrici dell'espansione, limitando quelli dentoalveolari, riducendo i rischi chirurgici e garantendo risultati stabili nel tempo [10,24,25].

Sebbene la MARPE abbia mostrato elevati tassi di successo nei cosiddetti *late adolescents* [26], nei pazienti adulti il trattamento può essere associato a una percentuale di fallimento relativamente elevata [15–17,21–23]. Per questo motivo, negli ultimi anni numerosi studi si sono concentrati sullo sviluppo di procedure minimamente invasive da associare all'espansione dell'arcata superiore, con lo scopo di ridurre o prevenire l'insuccesso terapeutico. Tra le tecniche chirurgiche proposte in combinazione con la MARPE per diminuire la resistenza suturale e

favorire l'apertura della sutura rientrano la *corticotomy-assisted expansion* (CAE), che prevede l'esecuzione di specifiche corticotomie a supporto dell'espansione mascellare, e la *corticopuncture facilitated microimplant-assisted rapid palatal expansion* (CP + MARPE), basata sull'esecuzione di corticopunture lungo il decorso della sutura in associazione a un dispositivo espansore supportato da miniviti [27–29].

Il presente studio si propone di analizzare e confrontare differenti protocolli terapeutici impiegati per la correzione del deficit trasversale del mascellare superiore in soggetti con maturazione scheletrica avanzata. L'obiettivo è valutare le modalità di espansione ottenute e quantificarne l'entità attraverso misurazioni effettuate su immagini TC cone-beam e mediante analisi tridimensionali.

A tal fine, un primo gruppo di pazienti è stato sottoposto a trattamento con MARPE associata a corticopuntura, mentre un secondo gruppo, costituito da pazienti adulti, è stato trattato mediante SARPE. Un terzo gruppo ha ricevuto un trattamento combinato con MARPE e corticopuntura.

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

1.1. Cenni di anatomia

1.1.1. Osso mascellare

L'osso mascellare è un osso pari e simmetrico costituito da due metà che si uniscono medialmente attraverso i rispettivi processi palatini, contribuendo in larga misura alla formazione del palato duro. Esso si articola superiormente con l'osso frontale, l'osso etmoide e l'osso lacrimale, medialmente con l'osso palatino e il cornetto nasale inferiore, lateralmente con l'osso zigomatico e posteriormente con l'osso sfenoide. Dal punto di vista anatomico è costituito da un corpo e da quattro processi: frontale, zigomatico, palatino e alveolare (Fig. 1).

Il corpo del mascellare presenta una forma piramidale ed è pneumatizzato poiché al suo interno è contenuto il seno mascellare, la più grande cavità aerea appartenente

ai seni paranasali. In esso si distinguono quattro superfici: anteriore, posteriore o infratemporale, superiore o orbitaria e mediale o nasale.

La superficie mediale, detta anche faccia nasale, partecipa alla delimitazione delle cavità nasali. A questo livello si trova l'apertura del seno mascellare, rappresentata dallo hiatus mascellare. La faccia nasale appare ampiamente incompleta proprio per la presenza di tale apertura. Anteriormente allo hiatus mascellare è presente il solco nasolacrimale, disposto verticalmente, che attraverso l'articolazione con l'osso lacrimale e il cornetto inferiore si trasforma nel canale nasolacrimale.

Sulla faccia anteriore del mascellare si osserva la fossetta incisiva, sede di origine del muscolo omonimo. Lateralmente a questa, la radice del canino determina una prominenza denominata bozza canina, la quale delimita lateralmente una lieve depressione nota come fossa canina. Superiormente alla fossa canina si apre il foro infraorbitario, attraverso il quale emerge il nervo infraorbitario. La porzione mediale della faccia anteriore termina con un margine arcuato, definito incisura nasale, che articolandosi con il mascellare controlaterale contribuisce alla formazione dell'apertura piriforme, principale accesso alle cavità nasali.

La faccia superiore, o orbitaria, prende parte alla costituzione della maggior parte del pavimento dell'orbita.

La faccia superiore, o orbitaria, è attraversata centralmente dal solco infraorbitario, che prosegue anteriormente trasformandosi nel canale infraorbitario. Da quest'ultimo si dipartono i canali alveolari anteriori, destinati agli alveoli degli incisivi e del canino superiore. La faccia posteriore, definita anche infratemporale, contribuisce alla delimitazione della fossa infratemporale. Nella sua porzione centrale è presente la tuberosità mascellare, dalla quale originano i canali alveolari posteriori diretti ai denti premolari e molari superiori.

Il processo frontale è costituito da una lamina ossea orientata verticalmente che prende origine dal margine mediale della faccia nasale. Esso presenta una superficie laterale, una mediale e tre margini liberi: anteriore, posteriore e superiore.

Sulla superficie laterale si evidenzia la cresta lacrimale, che inferiormente termina in corrispondenza dell'incisura lacrimale della faccia superiore del corpo del mascellare e lateralmente si continua nel margine infraorbitario. La superficie mediale presenta superiormente la cresta etmoidale, in rapporto con il cornetto medio dell'etmoide, e inferiormente la cresta conca, che si articola con il cornetto inferiore.

Il processo zigomatico costituisce la prosecuzione laterale dell'apice della piramide mascellare. È formato da tre superfici e da un apice che si articola con l'osso zigomatico.

Il processo palatino è rappresentato da una lamina ossea quadrangolare disposta orizzontalmente che si estende medialmente fino ad articolarsi con il corrispondente processo controlaterale, contribuendo alla formazione della maggior parte del palato osseo. In esso si distinguono una faccia superiore, o nasale, una faccia inferiore, o buccale, e tre margini liberi: anteriore, mediale e posteriore. La faccia superiore partecipa alla costituzione del pavimento delle cavità nasali, mentre quella inferiore forma gran parte della volta della cavità orale. Il margine anteriore contribuisce alla delimitazione dell'apertura piriforme; il margine mediale, unendosi a quello controlaterale, forma la struttura palatina mediana e termina anteriormente con la spina nasale anteriore; il margine posteriore si articola invece con la lamina orizzontale dell'osso palatino, prendendo parte alla formazione della sutura palatina trasversa. Il processo alveolare è formato da due lamine ossee parallele, una interna e una esterna, collegate tra loro da setti ossei trasversali, interdentali o intralveolari, che delimitano gli alveoli dentali. Queste cavità ospitano le radici degli elementi dentari e presentano, a livello della loro base, un forame che consente il passaggio delle strutture vascolari e nervose dirette a ciascun dente [30–32].

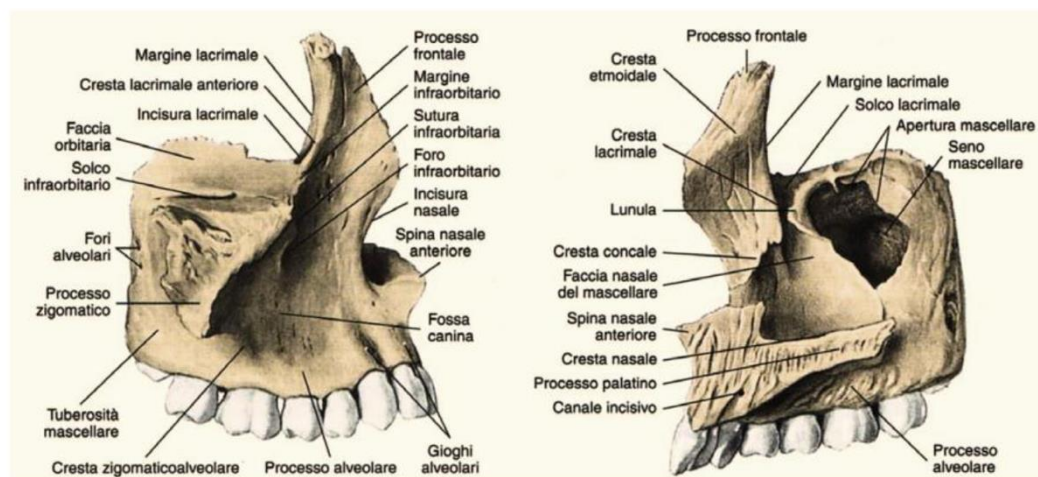


Figura 1 – Faccia laterale e faccia mediale dell'osso mascellare di destra. (Modificata da Anastasi G, Capitani S, Carnazza ML, et al. *Anatomia umana. Trattato vol. 1-3. Quarta edizione. Ed. Ermes; 2010*)

1.1.2. Anatomia del palato

La regione palatina costituisce il limite superiore della cavità orale propriamente detta. Dal punto di vista anatomico, il palato viene suddiviso in palato duro e palato molle. Il palato duro occupa i due terzi anteriori della struttura, mentre il palato molle comprende una porzione orizzontale, che si continua posteriormente al palato duro completando il terzo posteriore della volta della cavità orale, e una porzione verticale, che partecipa alla formazione della parete posteriore della cavità orale.

Nel palato duro si riconoscono quattro piani anatomici: mucoso, sottomucoso, periostale e osseo. Esso presenta pertanto una struttura osteo-fibro-mucosa, nella quale il supporto scheletrico è costituito dai processi palatini delle ossa mascellari e dalle lamine orizzontali delle ossa palatine, rivestiti da uno strato di muco-periostio.

La morfologia della volta palatina è soggetta a notevoli variazioni in relazione a fattori quali età, sesso, costituzione individuale e sviluppo del complesso cranio-facciale. Il palato duro deriva dall'unione dei processi palatini delle ossa mascellari con le lamine orizzontali delle ossa palatine.

L'osso palatino, analogamente al mascellare, è un osso pari e simmetrico. È formato da una lamina orizzontale e da una lamina perpendicolare, unite tra loro attraverso il processo piramidale, orientato in direzione posterolaterale. Superiormente alla lamina perpendicolare si individuano inoltre due ulteriori processi, denominati processo orbitario e processo sfenoidale, separati da una profonda incisura nota come incisura sfenopalatina (Fig. 2).



Figura 2 – Faccia laterale e faccia mediale dell'osso palatino di destra. (Modificata da Anastasi G, Capitani S, Carnazza ML, et al. *Anatomia umana. Trattato vol. 1-3. Quarta edizione. Edi. Ermes; 2010*)

L'ossificazione dell'osso palatino avviene per via membranosa e prende origine da un unico centro di ossificazione che compare tra la sesta e l'ottava settimana dello sviluppo embrionale. Nel neonato, altezza e larghezza dell'osso presentano dimensioni pressoché equivalenti, mentre nell'individuo adulto l'altezza risulta approssimativamente doppia rispetto alla larghezza.

La mucosa che riveste il palato duro è di tipo masticatorio e presenta una colorazione rosa pallido tendente al bianco. Essa segue fedelmente il profilo della volta ossea sottostante e, lungo i margini, si continua con la gengiva palatale, mentre posteriormente prosegue nella mucosa del palato molle. In corrispondenza della linea mediana è visibile un rilievo longitudinale denominato rafe palatino, che anteriormente termina in una piccola prominenza nota come papilla incisiva. Dalla papilla incisiva e dalla porzione anteriore del rafe si dipartono le rughe palatine.

Nel palato duro, il piano sottomucoso ospita numerose ghiandole salivari minori, mentre le strutture neurovascolari decorrono all'interno del tessuto connettivo compreso tra il piano sottomucoso e quello periostale. L'apporto vascolare è garantito principalmente dall'arteria palatina maggiore e dall'arteria nasopalatina. L'innervazione è affidata al nervo palatino e al nervo nasopalatino, entrambi rami della seconda divisione del nervo trigemino. Il nervo palatino maggiore, noto anche come nervo palatino anteriore, origina dal ganglio sfenopalatino localizzato nella fossa pterigopalatina. Esso provvede all'innervazione sensitiva somatica dell'emipalato omolaterale e veicola inoltre fibre parasimpatiche coinvolte nella regolazione della secrezione delle ghiandole salivari minori.

Nel palato molle è possibile distinguere diversi piani anatomici: il piano mucoso, il piano sottomucoso, il piano costituito dall'aponeurosi palatina e dalla muscolatura, e infine il piano mucoso faringeo. La componente muscolare del palato molle è formata da cinque muscoli: il muscolo tensore del velo palatino, il muscolo elevatore del velo palatino, il muscolo palatoglossso, il muscolo palatofaringeo e il muscolo dell'ugola.

L'irrorazione sanguigna del palato molle è garantita principalmente dalle arterie palatine minori e dall'arteria palatina ascendente, ramo dell'arteria facciale. L'innervazione comprende componenti sia sensitive sia motorie. La sensibilità è assicurata dal nervo palatino maggiore e dal nervo nasopalatino, mentre l'innervazione motoria è affidata alle fibre provenienti dal plesso pterigoideo [30–32].

1.1.3. Suture craniche

1.1.3.1. Anatomia suturale

Il mascellare intrattiene stretti rapporti anatomici con numerose ossa dello splanocranio, tra cui l'osso zigomatico, il lacrimale, il frontale, l'osso nasale, l'osso palatino, l'etmoide e il vomere. L'articolazione con queste strutture determina la formazione di diverse suture cranio-facciali, tra cui le suture nasofronto-mascellare, maxillo-palatina, pterigo-palatina, zigomatico-mascellare, lacrimo-mascellare ed etmoido-mascellare. Nel loro insieme, tali articolazioni vengono definite suture circum-mascellari e si distinguono dalle suture propriamente mascellari, rappresentate dalla sutura interincisiva, dalla sutura palatina mediana, dalla sutura palatina trasversa e dalla sutura incisivo-canina [31]. Le suture costituiscono siti di crescita secondaria adattativa. Esse, infatti, non possiedono una capacità autonoma di accrescimento, ma la loro crescita rappresenta una risposta reattiva secondaria a forze espansive responsabili del reale spostamento delle strutture ossee. Di conseguenza, le suture non devono essere considerate sedi di accrescimento primario, bensì aree dotate di potenziale espansivo, nelle quali la deposizione di nuovo tessuto osseo avviene come risposta alle forze dislocanti che determinano l'allontanamento reciproco dei margini ossei contrapposti [30].

Lo sviluppo delle suture avviene attraverso differenti stadi evolutivi. Ogni sutura è costituita da due margini ossei separati da tessuto connettivo interposto, il quale viene progressivamente sostituito da tessuto osseo nel corso del tempo.

Quando il tessuto connettivo interposto viene progressivamente sostituito da tessuto osseo, le due ossa giungono a diretto contatto articolare e non sono più in grado di aumentare la propria estensione. Questo processo corrisponde alla trasformazione della sindesmosi in sinostosi. Nonostante l'avvenuta ossificazione, le suture continuano comunque a svolgere un'importante funzione meccanica, contribuendo all'interruzione e alla ridistribuzione delle forze che agiscono sulle strutture ossee [33].

L'età alla quale si verifica l'ossificazione delle suture è stata ampiamente dibattuta in letteratura, probabilmente a causa della marcata variabilità interindividuale

osservata. La sutura palatina mediana, che rappresenta la più studiata tra le suture cranio-facciali, mostra con una certa frequenza una chiusura non completa anche in età adulta. Per quanto riguarda la sutura premaxillo-mascellare, il processo di ossificazione interessa inizialmente la porzione più esterna già intorno ai quattro anni di età, completandosi tuttavia solo in una fase più tardiva, generalmente intorno ai diciassette anni. La sutura naso-frontale tende invece a presentare sinostosi tra i sei e i sette anni di età. Le suture pterigo-palatina e maxillo-palatina mostrano la comparsa di ponti ossei mediamente tra i dodici e i quattordici anni. La sutura fronto-zigomatica completa il proprio processo di ossificazione in età relativamente avanzata. La sutura zigomatico-mascellare, al contrario, presenta un inizio precoce del processo di ossificazione, che procede però lentamente e raggiunge il completamento intorno ai venticinque anni di età, consentendo l'incremento del diametro trasversale del massiccio facciale [34].

1.1.3.2. Suture craniche e accrescimento del mascellare superiore

L'osso mascellare presenta un modello di crescita orientato in senso antero-inferiore. Tale sviluppo è associato alla formazione di nuovo tessuto osseo lungo i margini suturali. In particolare, l'incremento della dimensione verticale e sagittale del mascellare superiore dipende dalla capacità adattativa di diverse suture, tra cui la fronto-mascellare, la maxillo-malare, la zigomatico-malare, la pterigo-palatina, la premaxillo-malare e la palatina trasversa, sotto l'influenza dello sviluppo del setto nasale e dei processi di rimodellamento funzionale legati, soprattutto, all'attività masticatoria. L'accrescimento trasversale del mascellare superiore è invece correlato alle suture mascellari propriamente dette, ossia le suture internasali, intermascellari e interpalatine, oltre che ai fenomeni di apposizione e riassorbimento osseo.

Lo spostamento del mascellare in avanti e verso il basso è strettamente legato alla quantità di tessuto osseo neoformato. Poiché l'apposizione ossea avviene posteriormente al mascellare, in direzione della base cranica, la produzione di nuovo tessuto determina un progressivo riposizionamento anteriore della struttura. Numerosi fattori influenzano inoltre la crescita del mascellare superiore, sia attraverso un'azione diretta esercitata da stimoli funzionali, sia indirettamente mediante lo sviluppo delle regioni anatomiche adiacenti. Tra questi rientrano lo

sviluppo della capsula nasale, dei processi pterigoidei e dei seni mascellari, le pressioni esercitate dalla lingua sulla volta palatina, le forze masticatorie trasmesse dagli elementi dentari dell'arcata superiore, le azioni muscolari provenienti da labbra e guance durante masticazione, respirazione e deglutizione, nonché lo sviluppo della dentizione monofisaria.

Nei primi anni di vita si osserva una rapida crescita del cervello, della capsula nasale e del setto nasale, fenomeni che determinano un importante sviluppo dell'osso frontale. In questo contesto, i lobi frontali, insieme alla capsula nasale, al setto nasale e alla base cranica, contribuiscono a spingere anteriormente il mascellare. Parallelamente si verifica l'espansione delle orbite, che favorisce ulteriormente l'anteriorizzazione della mascella. Lo spostamento in avanti del mascellare è inoltre influenzato dalla trazione esercitata dai muscoli del palato molle, dalla lingua e dalle connessioni muscolari con la mandibola. Questo meccanismo si mantiene fino a circa quattro anni di età, momento oltre il quale tali fattori assumono un ruolo meno rilevante. Rimangono tuttavia attivi i processi di apposizione e riassorbimento periostale a livello orbitario, responsabili della progressiva discesa del mascellare. Lo sviluppo trasversale della mascella dipende principalmente dalla crescita della capsula nasale, dei seni mascellari e dei processi pterigoidei.

Le regioni più periferiche del mascellare, in particolare quelle anteriori, sviluppano le proprie caratteristiche soprattutto in risposta alle funzioni oro-facciali, quali masticazione, deglutizione e respirazione. La lingua esercita un'importante azione espansiva sul palato, mentre le guance influenzano i processi di crescita del mascellare. L'eruzione e lo sviluppo degli elementi dentari determinano inoltre un aumento volumetrico della mascella nei tre piani dello spazio. La migrazione dei denti verso il basso contribuisce all'incremento della dimensione verticale; l'aumento del numero di elementi presenti in arcata influenza lo sviluppo sagittale; infine, la direzione di eruzione e la progressiva comparsa dei denti in arcata favoriscono l'espansione posteriore del palato mediante un allungamento divergente dell'arcata dentaria, determinando così un incremento della dimensione trasversale [35].

1.1.3.3. Maturazione della sutura palatina mediana

La sutura palatina mediana rappresenta la struttura anatomica che separa le due emimascelle e si estende dal forame incisivo fino alla spina nasale posteriore. Essa è costituita da una porzione anteriore, definita sutura intermascellare, situata tra i processi palatini dei due mascellari, e da una porzione posteriore, denominata sutura interpalatina, localizzata tra i processi orizzontali delle ossa palatine. La sua crescita è pari a circa 1 mm all'anno fino ai cinque anni di età; successivamente il ritmo di accrescimento si riduce a circa 0,25 mm annui fino al termine della pubertà. Dopo tale periodo si osserva un'ulteriore crescita residua di circa 1,5 mm. Il processo di obliterazione inizia generalmente tra i 15 e i 18 anni e si completa in un intervallo compreso tra i 25 e i 35 anni. Già dopo i 10 anni di età iniziano a comparire le prime interdigitazioni ossee; la sutura permane mediamente nello stadio di sinfibrosi fino ai 12-14 anni nelle femmine e fino ai 14-16 anni nei maschi, per poi andare incontro a una progressiva ossificazione che si conclude, nella maggior parte dei casi, intorno ai 25 anni con il raggiungimento della sinostosi completa.

L'età di inizio dell'ossificazione, così come le modalità e la velocità con cui tale processo si sviluppa, presentano una notevole variabilità individuale. In alcuni soggetti lo stato di sinfibrosi può persistere anche molto tempo dopo il completamento della crescita scheletrica, e la sinostosi può non essere ancora completa all'età di 25 anni. Affinché sia possibile ottenere una disgiunzione rapida del palato, è fondamentale che le suture presentino un numero limitato di interdigitazioni. Con l'avanzare dell'età e con l'aumento dei ponti ossei a livello delle suture circum-mascellari, la probabilità di successo del trattamento espansivo tende, infatti, a diminuire [36].

Durante la crescita, la sutura palatina mediana è soggetta a profonde modificazioni morfologiche. Essa viene classificata come una sutura *end-to-end*, definizione che sottolinea il progressivo cambiamento della sua morfologia conseguente alla continua deposizione di nuovo tessuto [37]. L'evoluzione morfologica della sutura palatina mediana è stata descritta da Melsen nel 1975 attraverso uno studio condotto su materiale autoptico [38], nel quale sono stati identificati tre distinti stadi di sviluppo.

Nel primo stadio, corrispondente al periodo infantile, la sutura appare ampia e relativamente corta, assumendo una configurazione a Y per la presenza del vomere

collocato nel solco compreso tra i due mascellari. Nel secondo stadio, definito periodo giovanile, la sutura acquisisce un decorso progressivamente più ondulato e sinuoso. Nel terzo stadio, che coincide con l'adolescenza, la sutura presenta un andamento maggiormente tortuoso e un incremento delle interdigitazioni ossee, fino al raggiungimento della sinostosi definitiva, caratterizzata dalla completa sostituzione del tessuto connettivo originariamente presente con tessuto osseo.

Il processo di ossificazione della sutura palatina mediana prende avvio con la comparsa di spicole ossee e di isole ossee, ovvero masse calcificate acellulari che si formano casualmente all'interno dello spazio suturale. Le spicole ossee si sviluppano in più punti lungo il decorso della sutura, creando aree di connessione ossea alternate a regioni in cui permane tessuto connettivo. Con il progredire della crescita aumenta sia il numero delle spicole ossee sia il grado di interdigitazione. L'ossificazione si realizza inizialmente nella porzione posteriore della sutura e procede successivamente in direzione antero-posteriore attraverso processi di riassorbimento dell'osso corticale e deposizione di osso spugnoso [37,39].

Dal punto di vista clinico sarebbe estremamente utile poter determinare con precisione il momento di inizio dell'obliterazione suturale, il suo completamento e il grado di maturazione raggiunto. Tuttavia, non è stata dimostrata alcuna correlazione statisticamente significativa tra sesso, età cronologica e grado di obliterazione della sutura palatina mediana. Diversi studi hanno infatti evidenziato

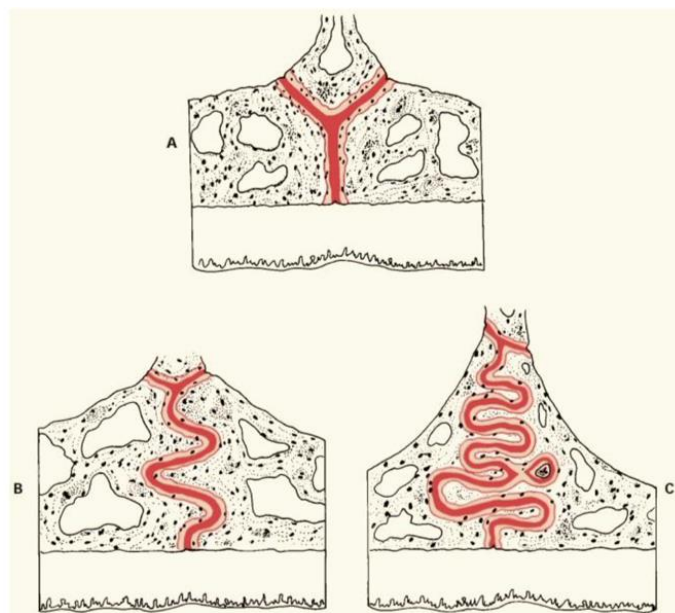


Figura 3 – Evoluzione della struttura istologica della sutura palatina mediana durante A) l'infanzia; B) la fase pre-adolescenziale; C) l'adolescenza. (Modificata da Melsen B. *Palatal growth studied on human autopsy material. A histologic microradiographic study. Am J Orthod.* 1975)

un'elevata variabilità individuale sia nell'inizio sia nella progressione del processo di chiusura della sutura [40–44].

1.2. Concetti di crescita e sviluppo

1.2.1. Sviluppo cranio-facciale

Lo sviluppo delle strutture cranio-facciali ha inizio intorno alla terza settimana di vita intrauterina. La maggior parte della morfogenesi facciale si realizza tra la quarta e l'ottava settimana di sviluppo embrionale, mentre alla decima settimana il volto risulta già sostanzialmente formato.

La quasi totalità dei tessuti che costituiscono faccia e collo deriva dall'ectoderma. A partire dalla terza settimana di gestazione, questo foglietto embrionale, sotto l'influenza del mesoblasto sottostante, va incontro a proliferazione e ispessimento mediante un processo definito delaminazione. Tale fenomeno segna l'inizio dello sviluppo delle cellule della cresta neurale, dalle quali origineranno successivamente le strutture scheletriche del massiccio facciale. Una parte di queste cellule migra inferiormente contribuendo alla formazione del tubo neurale, precursore del sistema nervoso centrale, mentre un'altra parte partecipa allo sviluppo degli archi branchiali, il cui insieme costituisce l'apparato branchiale o faringeo. Ogni arco branchiale è caratterizzato dalla presenza di una componente cartilaginea, una muscolare, una nervosa e una vascolare. Da questo apparato embrionale deriveranno le strutture muscolo-scheletriche e vascolo-nervose del distretto cranio-facciale, comprese la lingua e il collo.

La maggior parte delle anomalie cranio-facciali insorge durante le fasi di origine e migrazione delle cellule della cresta neurale. Poiché numerose strutture del volto derivano direttamente da queste cellule, eventuali alterazioni del loro sviluppo o della loro migrazione possono determinare la comparsa di malformazioni facciali. Una volta completata la migrazione cellulare, intorno alla quarta settimana di sviluppo embrionale, la crescita del volto viene regolata da specifici centri di crescita regionali, mentre i tessuti proseguono il proprio processo di differenziazione fino alla formazione degli organi.

La cavità orale primitiva deriva da una depressione situata sulla superficie ventrale dell'estremità cefalica dell'embrione, denominata stomodeo. Questa struttura è delimitata da cinque processi facciali: il processo frontale, che costituisce il limite superiore dello stomodeo; due processi mandibolari, derivanti dal primo arco branchiale e responsabili della formazione del pavimento dello stomodeo; e due processi mascellari, anch'essi originati dal primo arco branchiale e disposti lateralmente rispetto allo stomodeo.

Alla fine della quarta settimana compaiono sul processo frontale due ispessimenti ectodermici, i placodi olfattivi. La proliferazione del mesoderma circostante determina la formazione di un rilievo a ferro di cavallo che circonda tali strutture e le cui estremità danno origine ai processi nasali mediale e laterale. Successivamente i placodi si approfondiscono trasformandosi nelle fossette olfattive. Nello stesso periodo si verifica la fusione dei processi mandibolari lungo la linea mediana anteriore e la saldatura delle porzioni anteriori dei processi mascellari con i processi nasali laterali.

Nel corso della quinta settimana avviene la fusione tra i processi mascellari, i processi nasali laterali e quelli nasali mediali, evento che porta alla delimitazione delle primitive narici. Sempre durante la quinta settimana si realizza la fusione reciproca dei processi nasali mediali, con la formazione del premascellare, struttura destinata a evolvere nel filtro del labbro superiore e nel palato primitivo.

Intorno alla sesta settimana compare, all'interno del processo mascellare, un primo centro di ossificazione che si espande progressivamente verso le future regioni corrispondenti ai processi frontale, alveolare e palatino del mascellare. Contemporaneamente, verso la settima settimana, si sviluppano i processi palatini sulla superficie mediale dei processi mascellari. In questa fase essi assumono una direzione obliqua verso il basso poiché la lingua in accrescimento occupa ancora lo spazio mediano oro-nasale.

Durante l'ottava settimana la lingua si abbassa e i processi palatini modificano il proprio orientamento disponendosi orizzontalmente. Essi si fondono quindi tra loro lungo la linea mediana e anteriormente con il palato primitivo. Nello stesso periodo anche il setto nasale completa la sua fusione con la superficie superiore del palato. Questi eventi determinano la definitiva separazione tra cavità orale e cavità nasali. Parallelamente a tali processi, nel corso della sesta settimana compare all'interno dei processi mascellari la cartilagine di Meckel, derivata dal primo arco branchiale

insieme al martello, all'incudine e ai muscoli masticatori. Durante la vita intrauterina la mandibola presenta una crescita relativamente limitata, condizione che favorisce il parto. Dopo la nascita, tuttavia, il suo sviluppo diviene più marcato rispetto a quello delle altre strutture facciali, consentendo il raggiungimento delle corrette proporzioni scheletriche nell'età adulta.

Intorno all'ottava settimana compare inoltre, a livello dell'estremità posteriore della cartilagine di Meckel, la cartilagine condilare, dalla quale si sviluppano il condilo mandibolare e una porzione del ramo della mandibola [30].

1.2.2. Principi di crescita

Durante il normale processo di crescita e sviluppo dell'organismo si verificano una serie di modificazioni che seguono specifici modelli proporzionali, definiti pattern di crescita. Lo sviluppo corporeo umano segue un gradiente cefalo-caudale, secondo il quale alcune regioni anatomiche maturano prima di altre procedendo dalla testa verso i piedi. Nelle fasi iniziali dello sviluppo, pertanto, la testa presenta dimensioni proporzionalmente maggiori rispetto al resto del corpo.

Nel periodo fetale, intorno al terzo mese di vita intrauterina, la testa costituisce circa il 50% della lunghezza complessiva del corpo; il cranio appare più sviluppato del volto, gli arti superiori sono ancora in fase iniziale di formazione e il tronco risulta relativamente poco sviluppato. Alla nascita, la crescita più rapida del tronco e degli arti rispetto alla regione cranio-facciale determina una riduzione della proporzione della testa, che rappresenta circa il 30% della lunghezza corporea totale. Successivamente tale percentuale diminuisce progressivamente fino a raggiungere circa il 12% nell'adulto. Analogamente, gli arti inferiori passano da circa un terzo della lunghezza corporea totale alla nascita a circa la metà nell'età adulta.

Anche all'interno della testa si osservano importanti variazioni proporzionali tra il periodo neonatale e l'età adulta (Fig. 4).

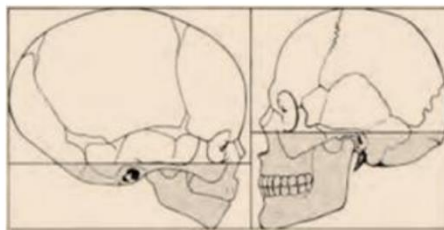


Figura 4 – Variazione delle proporzioni testa-faccia durante la crescita. (Modificata da Lowery GH. *Growth and Development of Children*. 1st ed. Chicago: Year Book Medical Publisher; 1973)

Nel neonato, infatti, il neurocranio presenta dimensioni proporzionalmente superiori rispetto al massiccio facciale. Con la crescita si verifica uno sviluppo più marcato delle strutture facciali rispetto a quelle craniche, determinando il raggiungimento delle proporzioni tipiche dell'adulto.

Il gradiente cefalo-caudale interessa anche il rapporto tra cranio e faccia. Per questo motivo la mandibola, essendo situata più distalmente rispetto al cranio, completa il proprio sviluppo più tardivamente e presenta una crescita più accentuata rispetto al mascellare superiore. Alla nascita la volta cranica è infatti quasi completamente sviluppata, mentre la crescita verticale di mascella e mandibola deve ancora realizzarsi.

Dal punto di vista istologico, la crescita può avvenire attraverso tre differenti meccanismi: l'iperplasia, caratterizzata dall'aumento del numero delle cellule; l'ipertrofia, che consiste nell'aumento del volume cellulare; e la secrezione di matrice extracellulare, responsabile dell'incremento volumetrico dei tessuti attraverso la produzione di sostanza extracellulare indipendentemente dalle variazioni del numero o delle dimensioni cellulari.

Tutti questi processi partecipano alla crescita dello scheletro. L'iperplasia rappresenta il meccanismo predominante nella maggior parte dei tessuti in crescita, mentre l'ipertrofia interviene in misura più limitata. La secrezione di matrice extracellulare assume un ruolo particolarmente rilevante nel sistema scheletrico, poiché tale matrice viene successivamente mineralizzata. La mineralizzazione determina una sostanziale differenza tra la crescita dei tessuti molli e quella dei tessuti duri.

I tessuti duri comprendono ossa, denti e alcune cartilagini, mentre tutti gli altri tessuti appartengono alla categoria dei tessuti molli. Nei tessuti molli e nelle cartilagini non calcificate la crescita avviene mediante una combinazione di iperplasia e ipertrofia distribuita in tutto il tessuto, fenomeno noto come crescita interstiziale. Nei tessuti mineralizzati, invece, la crescita si realizza per apposizione, poiché i processi cellulari responsabili dell'aumento di volume possono verificarsi esclusivamente sulle superfici ossee e non all'interno della massa già mineralizzata. La deposizione di nuovo tessuto osseo è garantita dall'attività delle cellule periostali, che producono matrice extracellulare successivamente soggetta a mineralizzazione.

La crescita interstiziale assume particolare importanza nello sviluppo scheletrico poiché gran parte dello scheletro deriva da modelli cartilaginei. Durante il terzo mese di vita intrauterina il condrocranio va incontro a una rapida crescita accompagnata da processi di maturazione e differenziazione.

L'ossificazione può svilupparsi a partire dal tessuto connettivo embrionale attraverso due differenti modalità: indiretta o endocondrale e diretta o intramembranosa. L'ossificazione endocondrale interessa il basicranio, l'etmoide, la colonna vertebrale, gli arti e il bacino. Nelle ossa lunghe si formano centri di ossificazione centrali e periferici che determinano la comparsa della diafisi e delle epifisi. Tra queste strutture permane una regione cartilaginea non mineralizzata, il piatto epifisario, che rappresenta il principale centro di crescita longitudinale delle ossa lunghe.

A livello del piatto epifisario è presente una zona di intensa proliferazione cellulare. Le cellule cartilaginee neoformate vengono progressivamente spinte verso la diafisi, dove aumentano di volume, producono matrice extracellulare e successivamente degenerano mentre la matrice va incontro a mineralizzazione e viene sostituita da tessuto osseo. La crescita prosegue finché la velocità proliferativa uguaglia o supera quella di maturazione. Al termine del periodo di sviluppo, la maturazione prevale sulla proliferazione, la cartilagine residua viene completamente sostituita da osso e il piatto epifisario scompare. Da questo momento la crescita in lunghezza è terminata, mentre continuano i processi di aumento dello spessore e di rimodellamento superficiale mediati dal periostio.

Anche il condilo mandibolare si sviluppa mediante ossificazione endocondrale, pur presentando caratteristiche differenti rispetto a quelle tipiche di un piatto epifisario. L'ossificazione intramembranosa interessa invece le ossa della volta cranica, il mascellare superiore e gran parte della mandibola. In questo processo il tessuto osseo si forma direttamente all'interno del mesenchima senza la presenza di un modello cartilagineo intermedio. La mandibola inizia il proprio sviluppo in prossimità della cartilagine di Meckel, derivata dal primo arco faringeo. L'ossificazione prende avvio da una condensazione mesenchimale localizzata all'estremità della cartilagine e procede posteriormente attraverso un meccanismo intramembranoso. Durante questo processo la cartilagine di Meckel va progressivamente incontro a regressione e scompare quasi completamente. Soltanto alcuni suoi residui contribuiscono alla formazione di due ossicini dell'orecchio

medio, senza partecipare in maniera significativa alla struttura definitiva della mandibola.

Il mascellare superiore origina da un centro di condensazione mesenchimale localizzato nei processi mascellari, sulla superficie laterale della capsula nasale. Sebbene durante lo sviluppo sia presente una cartilagine accessoria, definita cartilagine malare o zigomatica, essa viene completamente sostituita da osso prima della nascita e non contribuisce direttamente alla formazione del mascellare. Diversamente, la cartilagine condilare persiste e si sviluppa inizialmente come struttura indipendente, separata dal corpo mandibolare, fondendosi successivamente con il ramo in formazione intorno al quarto mese di vita intrauterina.

Due fenomeni fondamentali regolano la crescita ossea: il rimodellamento e la modellazione. Il rimodellamento è il risultato dell'equilibrio tra apposizione e riassorbimento osseo e consente la modifica delle strutture scheletriche anche dopo il completamento dell'ossificazione. Tale processo avviene attraverso la deposizione di nuovo osso e il contemporaneo riassorbimento nella stessa area anatomica. Un esempio tipico è rappresentato dai cambiamenti ossei associati allo spostamento dentale.

La modellazione, invece, permette l'adattamento della forma e delle dimensioni ossee alle esigenze funzionali dell'organismo, come avviene durante il riposizionamento del ramo mandibolare nel corso della crescita.

La volta cranica, formata mediante ossificazione intramembranosa, alla nascita è costituita da diverse ossa piatte separate da tessuto connettivo a livello delle suture craniche. Con il passare del tempo, l'apposizione di nuovo osso determina la progressiva obliterazione di questi spazi fino alla completa fusione delle ossa craniche nell'adulto. Le principali fontanelle sono la fontanella anteriore, posteriore, sfenoidale e mastoidea.

Le ossa del basicranio, al contrario, derivano da un modello cartilagineo e seguono un processo di ossificazione endocondrale. Durante lo sviluppo persistono tra i diversi centri di ossificazione delle bande cartilaginee denominate sincondrosi, tra cui assumono particolare importanza la sincondrosi sfeno-occipitale, intersfenoidale e sfeno-etmoidale. Queste strutture presentano una zona centrale di intensa proliferazione cellulare affiancata da cartilagine in maturazione, successivamente sostituita da osso. Tra le ossa della base cranica si instaurano

articolazioni immobili, analogamente a quanto avviene nella maggior parte delle ossa craniche e facciali, con l'eccezione della mandibola.

Il mascellare superiore si sviluppa esclusivamente mediante ossificazione intramembranosa. La sua crescita avviene sia attraverso l'apposizione ossea a livello delle suture che lo collegano al cranio e al basicranio, sia mediante processi di rimodellamento. Fino a circa sei anni di età, la crescita del basicranio contribuisce

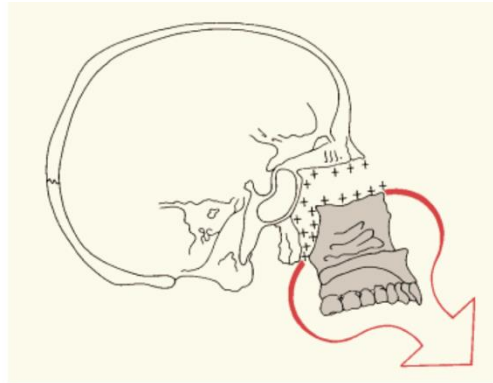


Figura 5 – La mascella trasla in basso ed in avanti, aprendo gli spazi suturali superiore e posteriore dove avviene l'apposizione di nuovo tessuto osseo. (Ridisegnata da Enlow D.H., Hans M.G.: *Essentials of facial growth*, Philadelphia, 1996, W.B. Saunders)

allo spostamento del mascellare in avanti e verso il basso (Fig. 5).

Tale dislocazione genera spazi a livello suturale che vengono progressivamente riempiti da nuovo tessuto osseo su entrambi i versanti della sutura. Mentre la larghezza delle suture rimane sostanzialmente costante, i processi del mascellare si allungano e le ossa circostanti aumentano di dimensioni. Contemporaneamente si verifica il riassorbimento della porzione anteriore della mascella, fenomeno che, insieme all'apposizione posteriore, costituisce il processo di rimodellamento necessario allo spostamento antero-inferiore del mascellare. Analoghi fenomeni di riassorbimento si osservano a livello del pavimento delle cavità nasali, mentre si verifica apposizione ossea sul versante orale.

A differenza del mascellare superiore, la mandibola si sviluppa sia per ossificazione intramembranosa sia per ossificazione endocondrale. La regione condilare è

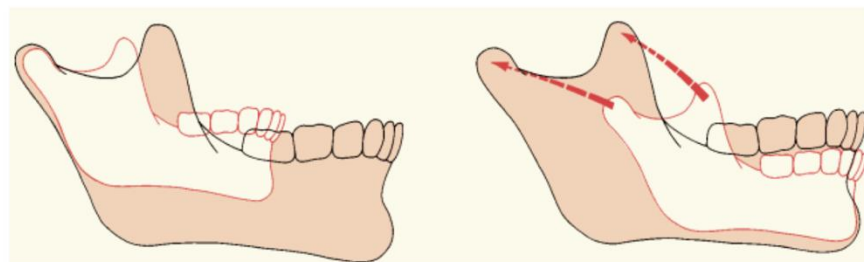


Figura 6 - La mandibola trasla in avanti e verso il basso e cresce in alto e verso l'indietro. (Ridisegnata da Enlow D.H., Hans M.G.: *Essentials of facial growth*, Philadelphia, 1996, W.B. Saunders)

rivestita da cartilagine e segue pertanto un meccanismo di ossificazione endocondrale. I condroblasti distribuiti sulla sua superficie promuovono la crescita del condilo e di parte del ramo mandibolare in direzione superiore e posteriore. Il corpo e gran parte del ramo mandibolare, invece, si sviluppano mediante ossificazione intramembranosa. I principali centri di crescita si localizzano nella regione posteriore del ramo e del processo coronoideo. Il corpo mandibolare aumenta la propria lunghezza grazie all'apposizione periostale localizzata posteriormente al ramo, mentre l'incremento verticale del ramo dipende principalmente dalla crescita endocondrale del condilo associata alla modellazione superficiale. Nel complesso, la mandibola viene dislocata in basso e in avanti mentre contemporaneamente si verifica deposizione ossea in alto e posteriormente (Fig. 6).

Analogamente a quanto avviene nel mascellare superiore, anche nella mandibola l'apposizione ossea posteriore del ramo è accompagnata dal riassorbimento della sua superficie anteriore. Durante la prima infanzia il ramo mandibolare è localizzato in corrispondenza dell'area di eruzione del primo molare; con la crescita si sposta progressivamente posteriormente, creando lo spazio necessario per l'eruzione del secondo e del terzo molare [45].

1.2.3. Teorie del controllo della crescita

La crescita dell'organismo è influenzata da numerosi fattori, tra cui il patrimonio genetico, lo stato nutrizionale, il livello di attività fisica e le condizioni generali di salute dell'individuo. La comprensione dei meccanismi che regolano la crescita scheletrica riveste un ruolo fondamentale per interpretare l'eziopatogenesi delle malocclusioni e delle deformità dento-facciali. Nonostante i numerosi studi condotti nel corso degli anni, i processi che controllano la crescita non sono ancora completamente chiariti e continuano a rappresentare un importante ambito di ricerca.

Sono state formulate principalmente tre teorie riguardanti il controllo della crescita. Secondo la prima, l'osso sarebbe il principale responsabile della propria crescita; la seconda attribuisce invece alla cartilagine il ruolo di fattore determinante dello sviluppo scheletrico, mentre l'osso avrebbe una funzione secondaria e passiva; la

terza teoria identifica nella matrice dei tessuti molli che circondano e contengono le strutture scheletriche il principale elemento regolatore della crescita sia ossea sia cartilaginea. La differenza fondamentale tra queste teorie riguarda la localizzazione del controllo genetico della crescita.

Nella prima teoria il controllo è attribuito al periostio, nella seconda alla cartilagine, mentre nella terza si ipotizza che la regolazione avvenga prevalentemente al di fuori del sistema scheletrico. Secondo quest'ultima interpretazione, la crescita di osso e cartilagine sarebbe controllata da meccanismi epigenetici e si realizzerebbe esclusivamente in risposta a stimoli provenienti da altri tessuti. Attualmente la teoria che attribuisce all'osso il controllo diretto della propria crescita è stata ampiamente superata, mentre risultano maggiormente accreditate la teoria cartilaginea e quella della matrice funzionale.

La teoria che considera la cartilagine come principale determinante della crescita cranio-facciale si basa sulla capacità di alcune strutture cartilaginee, come il setto nasale e la cartilagine condilare, di influenzare lo sviluppo delle ossa mascellari. Tuttavia, diversi studi hanno evidenziato che la cartilagine condilare, se trapiantata in altre sedi anatomiche, non manifesta un potenziale di crescita autonomo. Inoltre, è stato osservato che nel 75-85% dei casi la perdita del condilo in seguito a frattura non compromette significativamente la crescita mandibolare.

La terza teoria, nota come teoria della matrice funzionale di Moss, attribuisce invece il controllo della crescita alla matrice dei tessuti molli. Formulata negli anni Sessanta, essa sostiene che lo sviluppo cranio-facciale avviene come risposta a stimoli funzionali e influenze neurotrofiche, mediati dai tessuti molli nei quali sono inserite le strutture scheletriche. Moss distinse due differenti tipologie di matrice: la matrice periostale e la matrice capsulare. La matrice periostale comprende tutti i tessuti che influenzano una singola unità microscheletrica attraverso il periostio, come ad esempio i muscoli e gli elementi dentari. La matrice capsulare comprende invece quei tessuti racchiusi all'interno di una capsula che influenzano unità macroscheletriche, come nel caso dell'encefalo.

Secondo questa teoria, la crescita dei mascellari sarebbe strettamente correlata all'espansione delle cavità nasali e della cavità orale, che aumentano di volume in risposta a stimoli funzionali. Il concetto di matrice funzionale offre una chiave interpretativa per numerosi fenomeni che caratterizzano lo sviluppo cranio-facciale

e trova applicazione pratica in ambito ortodontico, dove viene utilizzato per comprendere e correggere alterazioni della crescita e malocclusioni [30,45].

1.3. Malocclusioni e problemi ortodontici

1.3.1. Normocclusione e Malocclusione

Il termine occlusione indica qualsiasi relazione intercorrente tra l'arcata mascellare e quella mandibolare, anche nel caso in cui il contatto riguardi soltanto alcuni elementi dentari antagonisti, sia in condizioni statiche sia durante i movimenti dell'articolazione temporo-mandibolare (ATM). Con le espressioni "occlusione normale" o "occlusione ideale" non si fa riferimento a una condizione perfetta in senso assoluto, bensì alla configurazione occlusale più frequentemente riscontrata nella popolazione e che, in genere, non necessita di interventi terapeutici.

Nel corso delle funzioni fisiologiche, quali deglutizione e masticazione, il contatto tra le superfici occlusali degli elementi dentari è regolato dall'azione integrata del sistema neuromuscolare masticatorio, dai meccanismi sensitivo-sensoriali dell'articolazione temporo-mandibolare e dal legamento parodontale. L'interazione di queste strutture consente il raggiungimento e il mantenimento di un'occlusione stabile, contribuendo alla salute dei tessuti dentali e parodontali. Quando l'occlusione si discosta dalla condizione ideale, tali sistemi sono generalmente in grado di adattarsi alle nuove condizioni funzionali. Tuttavia, qualora le alterazioni superino le capacità adattative del parodonto e dell'ATM, possono insorgere condizioni patologiche.

Affinché un'occlusione possa essere considerata ideale, dovrebbe soddisfare una serie di requisiti di natura dentale, muscolare, articolare ed estetica, tra cui:

- presenza di contatti bilaterali tra la maggior parte degli elementi dentari antagonisti in posizione di intercuspidação;
- distribuzione uniforme delle forze masticatorie su tutti i denti dell'arcata e lungo il loro asse longitudinale;
- presenza di una disclusione bilaterale priva di interferenze occlusali;
- assenza di contatti tra denti antagonisti nella posizione di riposo, con conseguente mantenimento dello spazio libero interocclusale;

- valori di overjet e overbite contenuti entro limiti fisiologici;
- corretti rapporti trasversali tra le arcate dentarie;
- posizionamento del primo molare superiore distalmente rispetto al primo molare inferiore di circa mezza cuspidè;
- allineamento e morfologia dentaria compatibili con le esigenze estetiche individuali e armonici rispetto alle proporzioni del volto.

Alla luce di tali criteri, le malocclusioni possono essere interpretate non tanto come vere e proprie anomalie, quanto piuttosto come variazioni anatomiche rispetto all'occlusione ideale, rappresentando di fatto la condizione occlusale più comune nella popolazione generale [30].

1.3.2. Eziopatogenesi delle malocclusioni

Le malocclusioni e le alterazioni dello sviluppo cranio-facciale derivano generalmente dall'interazione di numerosi fattori in grado di influenzare in maniera anomala la crescita e la maturazione del complesso cranio-mandibolare. Proprio a causa della natura multifattoriale di questi processi, nella maggior parte dei casi risulta difficile individuare una singola causa responsabile dell'insorgenza della malocclusione. Dal punto di vista eziologico, i fattori coinvolti possono essere suddivisi in tre principali categorie: cause specifiche, cause genetiche e cause ambientali [45].

1.3.2.1. Cause specifiche

Le cause specifiche di malocclusione sono frequentemente correlate a difetti dello sviluppo, tra cui deformità e malformazioni. Con il termine *deformità* si indica una condizione nella quale un tessuto si forma inizialmente in modo corretto ma successivamente non segue il normale percorso di sviluppo; il termine *malformazione*, invece, si riferisce a un tessuto che presenta un'anomalia già nelle fasi iniziali della sua formazione. Le cause specifiche possono agire in differenti momenti dello sviluppo, dall'epoca embrionale fino ai primi anni dell'età adulta. In questa categoria rientrano le alterazioni dello sviluppo embrionale, le

anomalie dello sviluppo scheletrico, le disfunzioni muscolari, l'acromegalia, i disturbi dello sviluppo dentale e i traumi dentari.

Le alterazioni che interessano lo sviluppo embrionale determinano frequentemente la morte dell'embrione. Gli agenti chimici o fisici responsabili di tali anomalie vengono definiti teratogeni quando agiscono durante periodi critici dello sviluppo embrionale. A basse concentrazioni questi agenti tendono a provocare difetti specifici, mentre a dosi più elevate possono avere effetti incompatibili con la sopravvivenza embrionale.

Le anomalie dello sviluppo scheletrico possono derivare da compressioni fetali e traumi ostetrici oppure da fratture mandibolari che si verificano durante l'infanzia. Le lesioni correlate alla nascita vengono generalmente suddivise in due gruppi: deformazioni da compressione intrauterina e traumi mandibolari associati al parto. Nel primo caso, le pressioni esercitate sulle strutture facciali durante la vita intrauterina possono alterare le normali aree di crescita. Nel secondo caso, traumi localizzati, in particolare a livello delle articolazioni temporo-mandibolari, possono determinare emorragie interne, perdita di tessuto e conseguente ipoplasia mandibolare. Tra le alterazioni dello sviluppo scheletrico rientrano inoltre le fratture mandibolari dell'età infantile, spesso conseguenti a cadute o traumi accidentali nei primi anni di vita.

Le disfunzioni muscolari comprendono tutte quelle condizioni caratterizzate da un'alterazione dell'attività della muscolatura. Durante la vita intrauterina, un danno muscolare può derivare da diverse cause, frequentemente associate a lesioni dei nervi motori, che comportano un ridotto sviluppo della porzione facciale interessata. Al contrario, una contrazione muscolare eccessiva può limitare la crescita di un lato del volto, determinando asimmetrie facciali. Diversamente, condizioni caratterizzate da una riduzione del tono muscolare, come la paralisi cerebrale infantile, possono favorire un eccessivo spostamento dei mascellari, associato a una maggiore eruzione dei denti posteriori, morso aperto anteriore e incremento della crescita verticale del volto.

L'acromegalia rappresenta un'altra possibile causa di malocclusione. Questa patologia è dovuta alla presenza di un tumore dell'ipofisi anteriore responsabile di una produzione eccessiva di ormone della crescita. Tale condizione determina un accrescimento eccessivo della mandibola che può portare allo sviluppo di una malocclusione scheletrica di III Classe in età adulta. In alcuni casi la crescita

anomala può arrestarsi spontaneamente, mentre nelle forme più severe la risoluzione richiede l'eliminazione della causa mediante intervento chirurgico e la successiva ricostruzione delle strutture coinvolte.

Le alterazioni dello sviluppo dentale possono essere associate a patologie congenite, ma più frequentemente sono responsabili di malocclusioni isolate di I Classe. Tra le anomalie di maggiore rilevanza clinica si annoverano l'agenesia dentale, la presenza di denti malformati o sovranumerari, le alterazioni dei processi eruttivi, la perdita precoce dei denti decidui e i traumi dentari.

Anche i traumi dentali costituiscono un importante fattore eziologico delle malocclusioni, soprattutto quando si verificano durante il periodo di formazione degli elementi dentari. Un trauma può infatti influenzare lo sviluppo oclusale attraverso tre differenti meccanismi: provocando un danno al germe del dente permanente in seguito a un trauma del corrispondente elemento deciduo, determinando lo spostamento di un dente permanente a causa della perdita precoce del deciduo oppure causando un danno diretto all'elemento permanente stesso [45].

1.3.2.2. Cause genetiche

Dal punto di vista genetico, l'ereditarietà rappresenta un fattore determinante nello sviluppo delle caratteristiche facciali e scheletriche dell'individuo. È infatti frequente osservare all'interno della stessa famiglia una ricorrenza di specifiche caratteristiche morfologiche, come particolari conformazioni del naso, della mandibola o del sorriso.

L'influenza ereditaria può contribuire all'insorgenza delle malocclusioni attraverso due principali meccanismi. Il primo consiste in una discrepanza genetica tra le dimensioni degli elementi dentari e quelle delle basi ossee mascellari, condizione che può favorire l'insorgenza di affollamenti o spaziature dentali. Il secondo meccanismo riguarda invece una sproporzione nella forma o nelle dimensioni reciproche di mascella e mandibola, responsabile della comparsa di rapporti oclusali non corretti.

Per quanto riguarda le caratteristiche scheletriche, il contributo dell'ereditarietà tende ad aumentare con l'età. Al contrario, nelle caratteristiche dentali l'influenza genetica sembra progressivamente ridursi, suggerendo un ruolo sempre maggiore dei fattori ambientali nel determinare le variazioni dentarie. Di conseguenza, le

componenti della malocclusione legate alle discrepanze scheletriche risultano verosimilmente più influenzate dal patrimonio genetico, mentre le alterazioni prevalentemente dentarie sembrano dipendere in misura maggiore da fattori ambientali.

Per tale motivo, nella pratica clinica, l'analisi delle caratteristiche cranio-facciali dei genitori rappresenta un utile strumento per formulare previsioni sull'evoluzione della crescita nei figli. Tra i pattern di crescita che più frequentemente mostrano una trasmissione familiare si annoverano il prognatismo mandibolare e l'iperdivergenza scheletrica [45].

1.3.2.3. Cause ambientali

I fattori ambientali che influenzano la crescita e lo sviluppo delle strutture cranio-facciali, dei mascellari e degli elementi dentari sono rappresentati principalmente dalle pressioni e dalle forze generate dalle normali attività funzionali dell'organismo.

Numerose evidenze suggeriscono che il rapporto tra forma e funzione durante lo sviluppo possa svolgere un ruolo significativo nella comparsa di malocclusioni e deformità dento-facciali. All'interno del cavo orale, la dentizione si trova normalmente in una condizione di equilibrio funzionale che consente ai denti di sopportare le forze masticatorie, intense ma di breve durata, senza subire modificazioni della propria posizione. Durante la masticazione, ad esempio, il fluido crevicolare presente nello spazio del legamento parodontale svolge una funzione ammortizzante (*shock absorber*), stabilizzando temporaneamente il dente mentre l'osso alveolare si deforma leggermente e il dente si sposta insieme ad esso. Quando una pressione intensa viene mantenuta per un periodo superiore a pochi secondi, compare una sensazione dolorosa progressivamente crescente che induce rapidamente l'interruzione dell'attività masticatoria. Forze di questo tipo, pur essendo elevate, non producono effetti permanenti sulla posizione dentaria poiché agiscono in maniera intermittente. Numerosi studi hanno infatti dimostrato che la masticazione non rappresenta un fattore in grado di modificare stabilmente la posizione dei denti.

Per ottenere uno spostamento ortodontico sono necessarie forze leggere e prolungate, applicate per circa sei ore al giorno. Le pressioni esercitate da lingua,

labbra e guance risultano meno intense rispetto a quelle masticatorie, ma agiscono per tempi molto più lunghi e possono quindi influenzare la posizione degli elementi dentari. Qualsiasi alterazione dell'equilibrio tra le pressioni esercitate dalla lingua e quelle generate da labbra e guance può determinare spostamenti dentali. Ad esempio, un processo cicatriziale a carico del labbro può aumentare la pressione sugli incisivi anteriori favorendone la lingualizzazione. Analogamente, una postura linguale alterata o un aumento volumetrico della lingua possono determinare vestibolarizzazione degli elementi dentari. Le stesse considerazioni sono applicabili alle strutture scheletriche, il cui sviluppo è fortemente influenzato dall'azione dei muscoli e dei tendini che vi si inseriscono.

Oltre alle pressioni fisiologiche esercitate dai tessuti molli, l'equilibrio dento-scheletrico può essere modificato anche da fattori esterni, come le abitudini viziate e gli apparecchi ortodontici. Le abitudini viziate sono comportamenti acquisiti durante l'età pediatrica che, se mantenuti nel tempo, possono interferire con il corretto sviluppo dento-alveolare e cranio-facciale. Tra le più comuni si annoverano il succhiamento del dito, la postura bassa della lingua e la respirazione orale. Il loro effetto dipende dall'età del soggetto, dalla frequenza, dall'intensità e soprattutto dalla durata delle forze esercitate. Quest'ultimo parametro rappresenta il fattore più importante: solo forze applicate per oltre sei ore al giorno sono generalmente in grado di produrre uno spostamento dentale significativo, indipendentemente dalla loro intensità.

Le abitudini di succhiamento non nutritivo sono particolarmente frequenti durante l'infanzia; tuttavia, la loro persistenza oltre i limiti fisiologici può favorire l'insorgenza di malocclusioni. Durante la dentizione decidua tali comportamenti producono generalmente effetti limitati e reversibili, mentre la loro permanenza durante la dentizione permanente può determinare sventagliamento degli incisivi superiori, lingualizzazione degli incisivi inferiori, morso aperto anteriore e ridotto sviluppo trasversale del mascellare superiore. Nel succhiamento del dito o del succhiotto, le alterazioni occlusali derivano dalla combinazione tra la pressione diretta esercitata sui denti e la modificazione delle pressioni normalmente esercitate da labbra e guance a riposo. Il dito interposto tra le arcate esercita infatti una spinta vestibolare sugli incisivi superiori e una spinta linguale su quelli inferiori, favorendone rispettivamente la protrusione e la retrusione. L'entità delle modificazioni dipende principalmente dal numero di ore giornaliere dedicate al

succhiamento piuttosto che dall'intensità della forza applicata. Bambini che succhiano il dito con forza ma per periodi brevi possono non sviluppare alterazioni significative, mentre un'abitudine protratta per oltre sei ore al giorno può determinare malocclusioni importanti.

Il morso aperto anteriore associato al succhiamento del pollice deriva dalla combinazione di due fenomeni: l'interferenza nell'eruzione degli elementi anteriori e l'eccessiva eruzione dei denti posteriori. Quest'ultima determina una rotazione mandibolare verso il basso con conseguente alterazione dei rapporti verticali. Per la geometria delle arcate dentarie, ogni millimetro di sovraeruzione posteriore può tradursi in circa due millimetri di aumento del morso aperto anteriore. Sebbene durante il succhiamento si generi una pressione negativa all'interno della cavità orale, essa non sembra essere la causa principale del restringimento dell'arcata superiore. Tale fenomeno appare piuttosto legato allo squilibrio tra la pressione delle guance e quella esercitata dalla lingua. La presenza del pollice tra le arcate obbliga infatti la lingua a mantenere una posizione più bassa, riducendo la pressione esercitata contro la superficie linguale dei denti posteriori superiori. Contemporaneamente aumenta la contrazione del muscolo buccinatore contro gli stessi elementi dentari.

La pressione delle guance risulta particolarmente intensa in corrispondenza delle commissure labiali, circostanza che spiega la tipica conformazione a V dell'arcata superiore osservata in molti soggetti con abitudini di succhiamento protratte, caratterizzata da un restringimento più marcato nella regione dei canini rispetto a quella dei molari.

Particolare attenzione è stata dedicata anche alla cosiddetta deglutizione atipica, condizione associata a un'alterata postura della lingua sia durante la deglutizione sia a riposo. Per quanto riguarda l'interposizione linguale tra gli incisivi durante la deglutizione, numerosi studi hanno dimostrato che i soggetti che presentano questo comportamento non esercitano pressioni dentarie superiori rispetto a coloro che deglutiscono normalmente. Inoltre, la deglutizione rappresenta un atto fisiologico inconscio e non appreso; pertanto, l'interposizione linguale non può essere assimilata alle classiche abitudini viziate.

Nei soggetti con morso aperto anteriore è tuttavia frequente osservare l'interposizione della lingua, utilizzata come sigillo anteriore insieme alle labbra per impedire la fuoriuscita di alimenti e liquidi dalla cavità orale. In questo contesto

la deglutizione atipica rappresenta una risposta adattativa funzionale. La maggior parte dei soggetti con open bite presenta infatti interposizione linguale, mentre non tutti gli individui con interposizione linguale sviluppano un morso aperto. Dopo l'eliminazione dell'abitudine di succhiamento, il morso aperto tende spesso a correggersi spontaneamente, mentre l'interposizione linguale può persistere fino al completamento della chiusura dell'open bite. Attualmente si ritiene che questo comportamento sia osservabile principalmente in due situazioni: nei bambini piccoli con occlusione normale durante la transizione dalla deglutizione infantile a quella adulta e nei soggetti con open bite anteriore o marcato overjet come meccanismo compensatorio. Sebbene la lingua possa contribuire allo sviluppo di alcune malocclusioni, l'interposizione linguale durante la deglutizione non è considerata di per sé responsabile di spostamenti dentari, poiché la durata della pressione esercitata risulta troppo breve per produrre modificazioni significative. Anche il modello respiratorio può influenzare lo sviluppo dento-scheletrico. La modalità di respirazione rappresenta infatti un importante fattore determinante per la posizione della mascella, della mandibola e della lingua. È stato dimostrato che la respirazione orale altera l'equilibrio pressorio all'interno della cavità orale, influenzando la crescita delle basi ossee e la posizione degli elementi dentari. Tra le conseguenze più frequentemente osservate vi sono l'aumento dell'altezza facciale anteriore associato alla sovraeruzione dei denti posteriori, la rotazione mandibolare in senso postero-inferiore con conseguente incremento dell'overjet e comparsa di morso aperto anteriore, nonché il restringimento dell'arcata superiore dovuto all'aumento della pressione esercitata dalle guance. Questo insieme di caratteristiche è noto in letteratura come *facies adenoidea*. Alla base della respirazione orale è generalmente presente un'ostruzione delle vie aeree nasali che riduce il passaggio dell'aria attraverso il naso e rende più difficoltosa la respirazione fisiologica. In tali situazioni, il primo obiettivo terapeutico consiste nell'identificazione e nella rimozione della causa dell'ostruzione, al fine di ripristinare una corretta respirazione nasale [45–52].

1.3.3. Classificazione delle malocclusioni

La prima classificazione sistematica delle malocclusioni fu proposta da Angle nel 1890 [53]. Tale sistema classificativo si fonda principalmente sul rapporto tra i primi molari permanenti e sulla posizione degli elementi dentari rispetto alla linea occlusale. Angle individuò tre differenti categorie di malocclusione in base alle possibili relazioni occlusali tra i primi molari superiori e inferiori:

- **I Classe:** rapporto molare normale, associato tuttavia ad alterazioni della linea occlusale dovute a malposizioni dentarie, rotazioni o altre anomalie.
- **II Classe:** primo molare inferiore posizionato distalmente rispetto al primo molare superiore, indipendentemente dalla descrizione della linea occlusale.
- **III Classe:** primo molare inferiore posizionato mesialmente rispetto al primo molare superiore, senza specificazioni riguardanti la linea occlusale.

Sulla base di tali criteri, la classificazione di Angle distingue quattro condizioni: occlusione normale, malocclusione di I Classe, malocclusione di II Classe e malocclusione di III Classe. L'occlusione normale e la malocclusione di I Classe condividono lo stesso rapporto molare; la differenza consiste nella disposizione degli elementi dentari rispetto alla linea occlusale. Nell'occlusione normale, infatti, il rapporto molare di I Classe si associa a un corretto allineamento dentario, mentre nella malocclusione di I Classe il rapporto molare rimane normale ma sono presenti anomalie quali affollamento, rotazioni o altre irregolarità dentarie.

La classificazione di Angle rappresentò una tappa fondamentale nello sviluppo dell'ortodonzia moderna, poiché fornì per la prima volta un metodo sistematico per classificare le malocclusioni e, soprattutto, introdusse una definizione semplice e chiara di occlusione normale, consentendo di distinguere in modo oggettivo le condizioni fisiologiche da quelle patologiche.

Tuttavia, già nei decenni successivi emersero alcuni limiti di questo sistema classificativo, legati principalmente alla mancata considerazione di aspetti rilevanti quali le discrepanze dento-alveolari e le alterazioni scheletriche.

L'introduzione della cefalometria mediante teleradiografia latero-laterale del cranio consentì inoltre di comprendere che le malocclusioni non derivano esclusivamente da anomalie dentarie, ma possono essere correlate anche a modificazioni dello sviluppo delle basi ossee mascellari. In base all'origine, le malocclusioni possono quindi essere distinte in:

- **Dentali**, quando l'alterazione interessa esclusivamente gli elementi dentari senza coinvolgere le strutture scheletriche;
- **Scheletriche**, quando è presente un eccesso o un deficit di crescita delle basi ossee;
- **Miste**, quando coesistono componenti sia dentarie sia scheletriche.

Oltre alla classificazione eziologica, le malocclusioni possono essere descritte anche in relazione ai tre piani dello spazio. In questo contesto si distinguono:

- malocclusioni del piano verticale;
- malocclusioni del piano sagittale;
- malocclusioni del piano trasversale.

Negli anni Sessanta, Ackerman e Proffit ampliarono formalmente il sistema di Angle elaborando una classificazione più completa basata sull'analisi di cinque caratteristiche fondamentali delle malocclusioni [54]. L'applicazione di questo metodo richiede una valutazione approfondita della dentatura e dei rapporti occlusali e scheletrici mediante esame clinico diretto, analisi dell'ortopantomografia ed eventualmente di radiografie endorali, oltre alla documentazione fotografica e allo studio cefalometrico delle proporzioni dentali e facciali.

Secondo questo sistema classificativo, l'analisi deve essere condotta seguendo una sequenza precisa che comprende la valutazione delle proporzioni e dell'estetica

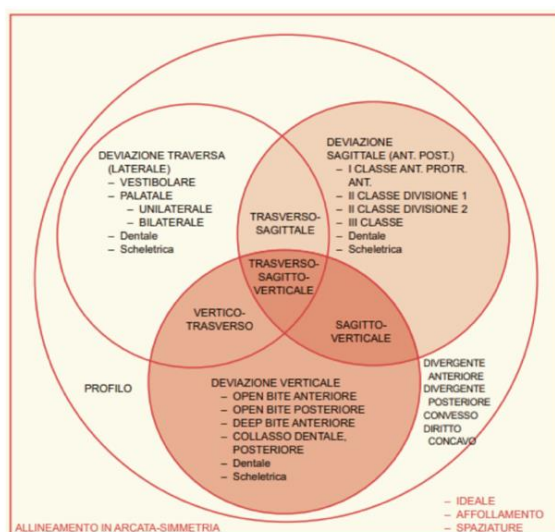


Figura 7 – Ackerman e Proffit hanno rappresentato le cinque principali caratteristiche di una malocclusione attraverso un diagramma di Venn. (Modificata da Proffit WR, Fields HW. *Contemporary Orthodontics*. 3rd edition. Mosby; 2000)

dento-facciale, dell'allineamento e della simmetria delle arcate dentarie, dei rapporti trasversali, sagittali e verticali tra le arcate (Fig. 7).

La prima fase del sistema di classificazione prevede l'analisi delle proporzioni facciali e dell'estetica del volto. Attraverso l'esame clinico vengono valutate eventuali asimmetrie facciali, i rapporti antero-posteriori e verticali del complesso cranio-facciale e la prominenza delle labbra in relazione alla posizione degli incisivi. Le osservazioni cliniche ottenute devono successivamente essere confermate mediante l'analisi fotografica del volto e attraverso lo studio cefalometrico effettuato sulla teleradiografia latero-laterale del cranio.

Dopo la valutazione del profilo facciale, della posizione delle labbra e dell'esposizione degli incisivi, si procede all'analisi dell'allineamento e della simmetria delle arcate dentarie. In questa fase vengono esaminate la simmetria di ciascuna arcata, l'eventuale presenza di affollamento dentale e la presenza di spazi interdentali. Particolare importanza riveste inoltre la valutazione della protrusione incisale, la cui interpretazione corretta richiede necessariamente la conoscenza della distanza interlabiale a riposo, parametro indispensabile per una valutazione clinica accurata.

Successivamente viene effettuata l'analisi dei rapporti dentali e scheletrici nel piano trasversale. In questa fase i modelli in gesso delle arcate vengono montati in articolatore per consentire una valutazione accurata dei rapporti occlusali trasversali. Tale esame permette di descrivere in maniera dettagliata la malocclusione e di determinarne l'origine, distinguendo tra una componente prevalentemente dentale e una di natura scheletrica. La classificazione della malocclusione viene quindi formulata sulla base della posizione dei molari superiori rispetto ai corrispondenti molari inferiori (Fig. 8).

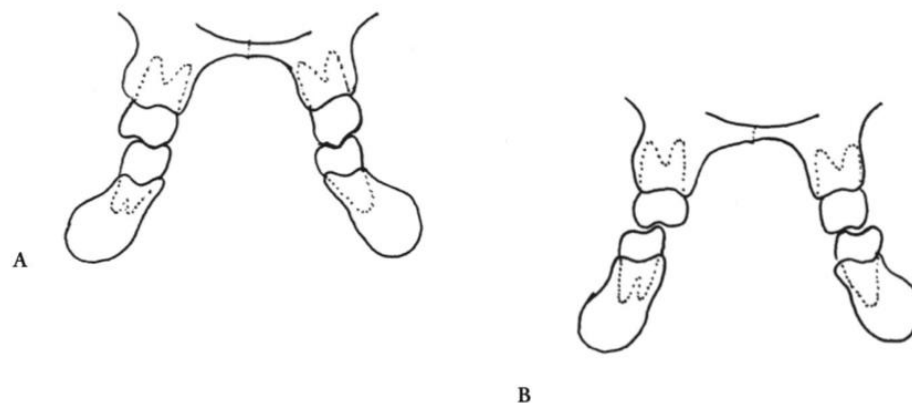


Figura 8 – Rappresentazione schematica della differenza tra crossbite posteriore di origine dentale e crossbite posteriore di origine scheletrica. (Modificata da Binder RE. *Correction of Posterior Crossbites: Diagnosis and Treatment. Pediatr Dent.* 2004;26(3):266-272.)

A titolo di esempio, un crossbite mascellare palatale bilaterale indica che i molari superiori di entrambi i lati sono posizionati più palatalmente rispetto alla loro normale collocazione. Al contrario, un crossbite mandibolare vestibolare monolaterale descrive una situazione in cui un molare inferiore risulta vestibolarizzato da un solo lato. Questa terminologia consente quindi di identificare quali elementi dentari, mascellari o mandibolari, si trovino in una posizione alterata rispetto alla norma.

Per determinare correttamente l'origine di un crossbite è indispensabile analizzare anche i rapporti scheletrici, così da individuare la reale alterazione anatomica sottostante. Ad esempio, in presenza di un crossbite mascellare palatale bilaterale, la causa può essere rappresentata da una riduzione trasversale della base ossea mascellare, configurando un crossbite di origine scheletrica. In alternativa, il crossbite può essere associato a una contrazione dell'arcata dentaria in presenza di una base scheletrica di dimensioni normali e di un'adeguata larghezza palatale; in questo caso si parlerà di crossbite di origine dentale.

Analogamente a quanto avviene per le discrepanze scheletriche nei piani sagittale e verticale, anche nel piano trasversale gli elementi dentari possono mettere in atto meccanismi compensatori in grado di mascherare alterazioni delle basi ossee.

Dopo la valutazione dei rapporti trasversali delle arcate, l'analisi prosegue con lo studio dei rapporti dentali e scheletrici nel piano antero-posteriore. In questa fase vengono esaminati i modelli dentari in occlusione per individuare eventuali

discrepanze sagittali che interessano i settori anteriori o posteriori delle arcate dentarie.

La classificazione proposta da Angle si fonda sul principio secondo cui il rapporto tra i primi molari permanenti antagonisti rappresenta la chiave dell'occlusione. In una condizione di occlusione normale, la cuspidè mesio-vestibolare del primo molare superiore è posizionata distalmente rispetto al primo molare inferiore di circa mezza cuspidè e si colloca in corrispondenza del solco mesio-vestibolare del molare inferiore.

Sulla base di questo rapporto, Angle individuò tre classi principali di malocclusione:

- **I Classe di Angle:** la cuspidè mesio-vestibolare del primo molare superiore occlude a livello del solco vestibolare del primo molare inferiore e gli elementi dentari risultano correttamente allineati. A una relazione molare di I Classe corrisponde normalmente anche una relazione canina di I Classe, nella quale il canino superiore occlude tra il canino inferiore e il primo premolare inferiore. Nella malocclusione di I Classe il rapporto molare rimane normale, ma possono essere presenti affollamento dentario, rotazioni o altre anomalie di posizione che interessano l'arcata superiore, quella inferiore o entrambe.

- **II Classe di Angle:** il primo molare superiore è posizionato mesialmente rispetto al primo molare inferiore di circa mezza cuspidè. Un analogo rapporto può essere osservato anche a livello dei canini. Questa condizione è frequentemente associata a una riduzione del diametro trasversale del mascellare superiore e alla presenza di un palato ogivale. La II Classe viene ulteriormente suddivisa in due divisioni sulla base dell'inclinazione degli incisivi superiori e dell'entità dell'overjet:

- **II Classe, prima divisione:** gli incisivi superiori risultano inclinati vestibolarmente. L'overjet appare generalmente aumentato, il palato si presenta stretto e allungato e le labbra tendono a essere incompetenti. Spesso questi pazienti presentano una respirazione prevalentemente orale.

- **II Classe, seconda divisione:** gli incisivi centrali superiori mostrano un'inclinazione normale o una lieve inclinazione palatale, mentre gli incisivi laterali superiori risultano maggiormente inclinati in senso vestibolare. Le labbra appaiono frequentemente sottili.

- **III Classe di Angle:** il primo molare superiore è situato distalmente rispetto al primo molare inferiore e la sua cuspidè mesio-vestibolare occlude posteriormente rispetto al solco vestibolare del molare inferiore. Lo stesso rapporto è generalmente presente anche a livello canino. In questi casi gli incisivi tendono a presentare un rapporto testa a testa o un morso inverso, l'overjet assume valori negativi e si osserva una differenza morfologica tra le arcate: quella superiore appare generalmente più piccola e triangolare, mentre quella inferiore risulta più ampia e di forma quadrangolare. La lingua assume frequentemente una postura bassa.

È fondamentale distinguere se la malocclusione sia di natura dentale o scheletrica. A tal fine risulta indispensabile l'analisi cefalometrica, che permette di identificare le basi anatomiche responsabili dell'alterazione occlusale.

Dopo la valutazione dei rapporti sagittali si procede all'analisi dei rapporti dentali e scheletrici nel piano verticale. Attraverso l'esame dei modelli dentari in occlusione è possibile identificare e descrivere le principali alterazioni verticali, rappresentate dal morso aperto (*open bite*) e dal morso profondo (*deep bite*).

L'**overbite** rappresenta la quantità di sovrapposizione verticale degli incisivi superiori sugli incisivi inferiori, espressa in millimetri. Il valore considerato ideale è pari a circa 2 mm, con una tolleranza di ± 1 mm. In condizioni normali, il margine incisale degli incisivi inferiori entra in contatto con la superficie linguale degli incisivi superiori in prossimità o al di sopra del cingolo.

Quando l'overbite risulta aumentato si parla di **morso profondo** (*deep bite*), mentre una riduzione dell'overbite identifica un **morso aperto** (*open bite*).

Il morso profondo rappresenta una delle alterazioni verticali più frequenti rispetto al morso aperto. Si parla generalmente di **deep bite severo** quando l'overbite supera i 5 mm. Il morso aperto, invece, è una condizione meno comune; viene considerato particolarmente grave quando l'overbite assume valori pari a circa -2 mm. Questa malocclusione è spesso associata alla presenza di abitudini viziate, come il succhiamento del dito o del succhiotto.

Anche per le problematiche del piano verticale è necessario integrare l'esame clinico con un'accurata valutazione cefalometrica, indispensabile per distinguere le componenti dentali da quelle scheletriche e per definire correttamente la natura della malocclusione [45].

1.4. Deficit trasversale del mascellare superiore

1.4.1. Definizione e caratteristiche

La discrepanza trasversale del mascellare superiore, definita anche *maxillary transverse deficiency* (MTD) [1], è una condizione caratterizzata da una riduzione della dimensione trasversale del mascellare superiore. La sua prevalenza risulta variabile in funzione della popolazione studiata: nei soggetti in dentizione mista l'incidenza riportata in letteratura varia approssimativamente dall'8% al 18% [55], mentre nei pazienti adulti o scheletricamente maturi non sono disponibili dati sufficienti per determinarne con precisione la frequenza [13].

La discrepanza trasversale può essere classificata in tre categorie principali: dentale, scheletrica oppure mista dento-scheletrica.

Nella forma dentale, le basi ossee e i processi alveolari presentano rapporti trasversali corretti, mentre l'alterazione riguarda esclusivamente l'inclinazione degli elementi dentari. Questo tipo di deficit dento-alveolare è frequentemente associato a problematiche della sequenza eruttiva e si manifesta generalmente con un'inclinazione palatale dei denti dell'arcata superiore e dei relativi processi alveolari, in assenza di una reale riduzione della larghezza del mascellare. In tali circostanze, la posizione degli elementi dentari non riflette la reale ampiezza trasversale della base ossea, configurando così una discrepanza di origine esclusivamente dentale.

La discrepanza trasversale scheletrica è invece caratterizzata da una riduzione della larghezza basale del mascellare superiore e si associa a un insufficiente sviluppo trasversale del terzo medio del volto.

La forma mista, o dento-scheletrica, rappresenta una combinazione delle due condizioni precedenti. In questo caso è presente una base scheletrica trasversalmente deficitaria associata a elementi dentari che mostrano una marcata inclinazione palatale [56].

McNamara ha proposto la valutazione del deficit trasversale del mascellare attraverso la misurazione della distanza tra i punti più vicini dei primi molari superiori, definita ampiezza transpalatale. Valori compresi tra 35 e 39 mm sono generalmente considerati adeguati a consentire l'alloggiamento di denti di

dimensioni medie senza determinare affollamento o diastemi. Al contrario, un'ampiezza inferiore a 31 mm è frequentemente associata ad affollamento dentario e può richiedere un trattamento ortodontico [1].

Tra i segni clinici più frequentemente associati al deficit trasversale del mascellare superiore vi è il crossbite, che può presentarsi in forma mono o bilaterale. Tuttavia, la diagnosi non deve basarsi esclusivamente sulla presenza del morso crociato, poiché devono essere considerati anche altri aspetti clinici, quali i compensi dento-alveolari sul piano trasversale, l'affollamento dentario e la protrusione degli elementi anteriori. Manifestazioni meno evidenti comprendono la vestibolo-inclinazione dei primi molari superiori e alcune alterazioni sagittali, come le malocclusioni di II e III Classe secondo Angle [57].

Alcuni studi [58] hanno evidenziato che l'affollamento dentario è più frequentemente correlato a una riduzione delle dimensioni dell'arcata mascellare piuttosto che a un aumento delle dimensioni dentarie. Questo suggerisce che le discrepanze trasversali e sagittali rappresentino fattori eziologici primari nello sviluppo dell'affollamento dentario.

La presenza di crossbite dipende dalla relazione tra discrepanza scheletrica e compensi dentali. Quando la posizione degli elementi dentari riflette la reale alterazione scheletrica, il crossbite è clinicamente evidente. Al contrario, in presenza di compensi dentali adeguati, può manifestarsi affollamento senza che sia presente un morso crociato.

Un ulteriore segno clinico caratteristico del deficit trasversale del mascellare superiore è rappresentato dai cosiddetti *dark spaces*, termine utilizzato per descrivere le aree d'ombra che compaiono agli angoli della bocca durante il sorriso. Poiché le diverse manifestazioni cliniche associate alla riduzione del diametro trasversale del mascellare possono presentarsi contemporaneamente, tale condizione viene spesso descritta come una vera e propria sindrome, definita *maxillary deficiency syndrome* [1].

1.4.2. Eziologia

L'eziologia del deficit trasversale del mascellare superiore è multifattoriale e può essere associata a numerose condizioni, tra cui abitudini viziate, in particolare il

succhiamento del pollice, la respirazione orale e la sindrome delle apnee ostruttive del sonno (OSAS), fattori iatrogeni, predisposizione ereditaria, alterazioni muscolari, malformazioni congenite, nonché quadri sindromici quali labioschisi e palatoschisi, sindrome di Treacher Collins, sindrome di Marfan, sindrome di Klippel-Feil, craniosinostosi e altre condizioni a eziologia complessa [13].

Tra le abitudini viziate, il succhiamento del dito rappresenta uno dei principali fattori associati allo sviluppo di un palato stretto. Tale condizione è correlata alla postura bassa della lingua, che favorisce la formazione di una volta palatina di forma triangolare e un restringimento particolarmente evidente nella regione intercanina. Anche la sindrome delle apnee ostruttive del sonno (OSAS) può contribuire allo sviluppo del deficit trasversale del mascellare. Questa patologia è caratterizzata dalla presenza di un'ostruzione nasofaringea che riduce la pervietà delle vie aeree superiori. La conseguente respirazione orale determina alterazioni della crescita cranio-facciale, manifestandosi con incompetenza labiale, postura bassa della lingua, rotazione mandibolare in senso postero-inferiore e aumento della tensione del muscolo buccinatore, che esercita una pressione compressiva sui molari mascellari [46].

Alcuni autori [59,60] hanno inoltre evidenziato che gli interventi chirurgici di riparazione del palato nei pazienti affetti da palatoschisi possono interferire con i normali processi di crescita cranio-facciale. In particolare, il processo di guarigione del mucoperiostio determina la formazione di tessuto cicatriziale caratterizzato prevalentemente da fibre collagene orientate trasversalmente e, in minor misura, verticalmente. Le fibre verticali tendono ad ancorarsi all'osso spugnoso in modo analogo alle fibre di Sharpey, creando un forte legame tra la cicatrice e il tessuto osseo sottostante. Le fibre trasversali sembrano invece proseguire nel parodonto cervicale, instaurando una connessione meccanica tra gli elementi dentari e il tessuto cicatriziale. Come conseguenza, al termine della crescita si osservano frequentemente una marcata inclinazione palatale dei denti e una limitazione dello sviluppo trasversale del mascellare superiore.

Per quanto riguarda il ruolo dell'ereditarietà, uno studio condotto da King et al. [61] su 104 coppie di fratelli successivamente sottoposti a trattamento ortodontico completo ha evidenziato che le stime di ereditarietà relative alle variabili craniometriche risultano significativamente inferiori rispetto a quelle osservate in adolescenti con occlusione fisiologica. Al contrario, le stime di ereditarietà riferite

alle caratteristiche occlusali risultano significativamente più elevate. Gli autori hanno pertanto ipotizzato che la somiglianza delle caratteristiche occlusali tra fratelli sia il risultato di una risposta analoga a fattori ambientali condivisi. In altre parole, individui appartenenti alla stessa famiglia, caratterizzati da una struttura cranio-facciale e da modelli di crescita geneticamente simili, tenderebbero a reagire in maniera comparabile a stimoli ambientali quali la riduzione delle sollecitazioni masticatorie o la respirazione orale cronica. Le malocclusioni sembrano quindi essere prevalentemente condizioni acquisite, sebbene la componente genetica della morfologia cranio-facciale possa indirizzare soggetti appartenenti alla stessa famiglia verso risposte fisiologiche simili e, di conseguenza, verso lo sviluppo di malocclusioni analoghe.

La letteratura riporta inoltre la presenza di deficit trasversale del mascellare superiore in associazione a diverse condizioni sindromiche e non sindromiche. Tra le sindromi maggiormente correlate figurano la sindrome di Klippel-Feil [62], la labiopalatoschisi [63], la stenosi congenita isolata delle aperture piriformi nasali [64], la sindrome di Marfan [65], le craniosinostosi [65] e la distrofia muscolare di Duchenne [66]. Il deficit trasversale del mascellare è stato inoltre descritto anche in forme di craniosinostosi non sindromiche [67].

1.4.3. Diagnosi

Per la diagnosi del deficit mascellare è necessaria una valutazione completa e accurata, che preveda esame clinico, analisi dei modelli ed esami radiografici [56]. Dal punto di vista clinico, è necessario valutare diversi aspetti come la forma dell'arco mascellare e la sua simmetria, la forma della volta palatale, l'ampiezza dei corridoi buccali durante il sorriso e il metodo di respirazione predominante (nasale o orale).

Segni clinici che possono suggerire una diagnosi di MTD sono: eccessivo corridoio buccale, presenza di depressioni paranasali, basi alari del naso strette, crossbite unilaterale o bilaterale, affollamento severo, palato V-shaped, volta palatale alta. Un altro fattore importante da individuare è un eventuale shift mandibolare in chiusura associato a crossbite unilaterale. Per identificare la natura dello shift è fondamentale utilizzare un dispositivo di deprogrammazione muscolare, soprattutto negli adulti,

dove la memoria cinetica e le influenze propriocettive sono radicate. La finalità è quella di permettere ai muscoli di muovere la mandibola senza interferenze occlusali [68].

Molto importante è anche l'analisi dei modelli, sia analogici che digitali, utile per studiare la forma di arcata e compiere specifiche misurazioni. Sono stati proposti diversi indici per misurare le discrepanze trasversali che offrono una guida alla diagnosi; tuttavia, sono popolazione-specifici e non completamente affidabili [69]. Con l'introduzione dei modelli digitali nella pratica clinica di routine, sono stati resi disponibili strumenti aggiuntivi per valutare la forma dell'arcata e l'inclinazione dei denti. I modelli digitali consentono infatti la visualizzazione in sezione coronale, offrendo così una visualizzazione più precisa dell'inclinazione buccolinguale dei denti [70].

Imprescindibili sono infine gli esami radiografici, in quanto permettono di stabilire lo stato di ossificazione della sutura palatale mediana. La sovrapposizione di altre strutture ossee limita l'utilizzo di radiografie occlusali, mentre sono particolarmente utili le teleradiografie anteroposteriori che identificano in modo semplice e affidabile la discrepanza scheletrica tra mascella e mandibola [71].

Betts et al. hanno proposto due differenti metodi per la quantificazione del deficit trasversale del mascellare superiore: l'indice differenziale di ampiezza maxillo-mandibolare e l'indice differenziale trasversale maxillo-mandibolare. Quest'ultimo, utilizzato anche nello studio corrente per la diagnosi della discrepanza trasversale mascellare, si basa sul calcolo della differenza tra il valore maxillo-mandibolare atteso e quello effettivamente rilevato nel paziente.

La differenza maxillo-mandibolare attesa viene definita come la differenza tra la distanza AG-GA, corrispondente alla larghezza mandibolare misurata tra i punti antegoniali destro e sinistro e determinata in base all'età del soggetto, e la distanza J-J (o Mx), che rappresenta la larghezza mascellare misurata tra le intersezioni destra e sinistra della tuberosità mascellare con l'osso zigomatico. La differenza maxillo-mandibolare effettiva viene invece ottenuta sottraendo la misurazione reale della larghezza mascellare J-J dalla misurazione reale della larghezza mandibolare AG-GA. L'indice differenziale trasversale maxillo-mandibolare corrisponde quindi alla differenza tra il valore teoricamente previsto e quello effettivamente registrato. Entrambi i metodi presentano tuttavia alcuni limiti. In particolare, la valutazione della discrepanza trasversale viene effettuata utilizzando punti di repere scheletrici

situati a una notevole distanza dagli elementi dentari e dalle basi apicali. Inoltre, l'orientamento della testa durante l'acquisizione radiografica può modificare i rapporti orizzontali tra le strutture anatomiche, rendendo più complessa la valutazione accurata della simmetria e delle distanze trasversali [72].

Negli anni Ottanta, Timms et al. introdussero l'impiego della tomografia computerizzata (TC) per la valutazione delle strutture cranio-facciali [73]. Nonostante le sue potenzialità diagnostiche, l'utilizzo della TC in ambito ortodontico rimase limitato a causa dei costi elevati e dell'importante esposizione alle radiazioni ionizzanti [74].

L'introduzione della tomografia computerizzata a fascio conico (*Cone Beam Computed Tomography*, CBCT) ha rappresentato un significativo progresso tecnologico, consentendo l'acquisizione di immagini caratterizzate da minori distorsioni geometriche, costi inferiori e una dose di radiazioni sensibilmente ridotta rispetto alla TC convenzionale. Studi recenti hanno evidenziato che la dose media associata alla CBCT varia tra 36,9 e 50,3 microsievert (μSv) [75–77], mentre la TC tradizionale comporta esposizioni comprese tra 1.320 e 3.324 μSv per la mandibola e tra 1.031 e 1.420 μSv per il mascellare superiore [78,79].

Un ulteriore vantaggio della CBCT è rappresentato dall'elevata risoluzione delle immagini ottenute. Grazie all'utilizzo di voxel isotropici, questa tecnologia consente infatti di raggiungere risoluzioni submillimetriche comprese tra 0,4 mm e 0,125 mm, garantendo una rappresentazione tridimensionale estremamente accurata delle strutture anatomiche cranio-facciali [74].

Questo tipo di tecnica radiografica è estremamente utile in quanto consente di effettuare valutazioni tridimensionali delle basi apicali, comprese le sezioni orizzontali a diversi livelli, permettendo un'analisi dettagliata delle discrepanze e delle asimmetrie nella loro natura e localizzazione [13].

1.4.4. Discrepanza trasversale e morso incrociato

Il morso incrociato (*crossbite*) è una condizione occlusale nella quale i molari superiori risultano posizionati più lingualmente rispetto alla loro collocazione ideale e/o i molari inferiori si trovano più vestibolarmente del normale. Di conseguenza, le cuspidi vestibolari dei molari superiori sono situate medialmente

rispetto alle cuspidi vestibolari dei molari inferiori, evidenziando una discrepanza nei rapporti vestibolo-linguali tra le due arcate dentarie.

Questa alterazione può essere classificata sia in base all'eziologia sia in base alla sua localizzazione anatomica [80]. Dal punto di vista eziologico si distinguono il morso incrociato scheletrico, dentale e funzionale. In relazione alla sede interessata, invece, si differenziano il morso incrociato anteriore e quello posteriore. Quest'ultimo può ulteriormente essere suddiviso in monolaterale o bilaterale a seconda che coinvolga uno o entrambi i lati dell'arcata.

Il morso incrociato scheletrico è determinato da una reale discrepanza trasversale tra le basi ossee mascellari. Può essere associato a numerosi fattori, tra cui ritardi dello sviluppo mascellare, ridotta larghezza dell'arcata superiore, traumi verificatisi durante il parto o nel corso della crescita, anomalie congenite come la labiopalatoschisi, predisposizione ereditaria, in particolare nei soggetti con III Classe scheletrica, e abitudini viziate quali succhiamento del dito, postura bassa della lingua e respirazione orale. Clinicamente può manifestarsi con un palato particolarmente stretto, una mandibola relativamente ampia o entrambe le condizioni contemporaneamente, spesso accompagnate da compensi dentali. Nei soggetti in dentizione permanente che presentano un morso incrociato monolaterale al termine della crescita, il difetto è generalmente attribuibile a un'asimmetria scheletrica e viene pertanto classificato come crossbite scheletrico.

Lo spostamento trasversale dei molari mandibolari è relativamente raro. Si parla di morso incrociato dovuto a eccessiva ampiezza mandibolare quando l'arcata mascellare presenta dimensioni normali mentre quella mandibolare risulta più ampia rispetto ai valori trasversali attesi per l'età e lo sviluppo del paziente. In presenza di crossbite associato a una larghezza mascellare normale e a una larghezza mandibolare aumentata, la discrepanza viene quindi attribuita a una componente scheletrica mandibolare.

Nel morso incrociato dentale, invece, la volta palatina presenta dimensioni adeguate, mentre i processi dento-alveolari mascellari risultano inclinati in senso linguale. Questa condizione può coinvolgere un singolo elemento dentario oppure un intero settore dell'arcata. Le cause più frequenti comprendono anomalie di numero, come agenesie o denti soprannumerari, alterazioni dimensionali quali microdonzia e macrodonzia, anomalie morfologiche dentarie, perdita precoce degli elementi decidui, ritardi nella permuta dentaria o condizioni di anchilosi. In questi

casi le basi scheletriche risultano normali, mentre il crossbite è determinato esclusivamente dall'inclinazione anomala di uno o più denti.

Il morso incrociato funzionale è caratterizzato dalla presenza di un precontatto occlusale che induce la mandibola a deviare durante la chiusura, determinando una posizione finale in crossbite. Tale situazione può essere causata da semplici interferenze dentarie, come denti ectopici, elementi decidui persi precocemente o denti cariati, oppure può essere associata a reali asimmetrie scheletriche mascellari o mandibolari. Quando la causa è rappresentata esclusivamente da un precontatto dentario, il posizionamento del paziente in relazione centrica evidenzia normalmente un corretto diametro trasversale mascellare e la scomparsa del crossbite in assenza dello shift mandibolare.

Il morso incrociato monolaterale si manifesta quando un'interferenza occlusale induce una deviazione mandibolare verso un lato oppure quando è presente una contrazione localizzata di una sola emiarcata mascellare. Clinicamente, in una delle due emiarcate il rapporto molare appare normale, con le cuspidi vestibolari dei molari superiori situate esternamente rispetto a quelle inferiori; nell'emiarcata opposta il rapporto è invertito e si osserva il morso incrociato. In questi casi le linee mediane dentarie raramente coincidono e si osserva frequentemente una deviazione mandibolare laterale. Il crossbite monolaterale può essere sia funzionale sia scheletrico. Nella forma funzionale il problema è dovuto alla deviazione mandibolare provocata da un precontatto, mentre le dimensioni trasversali delle arcate risultano sostanzialmente normali. Nella forma scheletrica, invece, è presente una reale discrepanza trasversale tra le basi ossee associata a un palato contratto.

Il morso incrociato bilaterale è generalmente associato a una costrizione trasversale del mascellare superiore che può derivare sia da fattori genetici sia da fattori ambientali, come respirazione orale e deglutizione atipica. In questa condizione la discrepanza tra le basi ossee superiore e inferiore è generalmente più marcata e il mascellare appare significativamente ristretto. A differenza del crossbite monolaterale, le linee mediane possono risultare coincidenti [45,54].

Il crossbite può interessare anche il settore anteriore delle arcate. In questi casi può essere associato sia a problematiche scheletriche sia a dislocazioni dentarie. Quando il crossbite coinvolge tutti gli incisivi, è raro che si manifesti in assenza di una componente scheletrica di III Classe. Infatti, il coinvolgimento di numerosi elementi anteriori suggerisce generalmente una discrepanza delle basi ossee

piuttosto che una semplice alterazione della posizione dentaria. Tuttavia, il crossbite anteriore può anche derivare esclusivamente da un malposizionamento dentale in assenza di anomalie scheletriche.

La causa più frequente di crossbite anteriore non scheletrico è la carenza di spazio destinato all'eruzione degli incisivi permanenti. In questi casi il trattamento non deve limitarsi alla correzione dell'inversione del morso, ma deve comprendere anche la gestione dello spazio disponibile nell'arcata. Poiché i germi dei denti permanenti si sviluppano lingualmente rispetto agli elementi decidui, una riduzione dello spazio disponibile può costringere gli incisivi superiori permanenti a erompere in posizione palatale rispetto alla linea dell'arcata, determinando il crossbite. Quando la diagnosi viene formulata prima del completamento dell'eruzione e della stabilizzazione dell'overbite, l'estrazione degli elementi decidui adiacenti può favorire una correzione spontanea. In particolare, l'estrazione del canino deciduo prima della completa eruzione dell'incisivo laterale consente frequentemente la risoluzione spontanea dell'inversione. Nei casi diagnosticati dopo il completamento dell'eruzione degli incisivi, è invece generalmente necessario ricorrere a una terapia ortodontica attiva mediante apparecchiature fisse o rimovibili [45].

1.5. Timing di trattamento e stadio di crescita

1.5.1. Timing del trattamento ortodontico

Il momento in cui viene intrapreso il trattamento rappresenta un elemento fondamentale per il successo della terapia ortodontica, poiché molte procedure volte a modificare la crescita devono essere eseguite prima del completamento del picco puberale e quindi durante il periodo di sviluppo scheletrico.

Con il termine trattamento intercettivo si indicano tutte quelle procedure ortodontiche effettuate durante la crescita con l'obiettivo di correggere una malocclusione già presente o di rendere più semplice ed efficace una successiva fase terapeutica [81]. Per pianificare correttamente il trattamento e ottimizzarne i risultati è quindi indispensabile valutare il grado di maturazione del paziente, il tipo

di crescita cranio-facciale e il potenziale di crescita residuo prima del raggiungimento della maturità scheletrica.

Per la valutazione della maturazione ossea possono essere utilizzati diversi indicatori biologici, tra cui l'età anagrafica, lo sviluppo dentale e la formula dentaria, il menarca nelle femmine, il cambiamento della voce nei maschi, l'incremento staturale e l'età scheletrica.

L'età anagrafica non coincide necessariamente con l'età biologica del soggetto; pertanto, da sola non rappresenta un parametro sufficiente per determinare con precisione la fase di crescita in cui si trova il paziente [4].

Generalmente la dentizione mista coincide con il periodo di maggiore attività di crescita. Nelle femmine il picco di crescita viene comunemente collocato tra i 10 e i 13 anni, mentre nei maschi tra gli 11 e i 14 anni [82]. Tuttavia, a causa dell'elevata variabilità individuale nella comparsa del picco puberale, l'età dentale non costituisce un indicatore sufficientemente affidabile della maturazione scheletrica, così come non lo è la sola valutazione dell'incremento staturale [83].

Anche il menarca nelle femmine e il cambiamento della voce nei maschi possono fornire informazioni utili sul livello di maturazione biologica, ma la loro accuratezza come indicatori della crescita scheletrica rimane limitata [84].

È inoltre importante considerare che i tempi di crescita e maturazione non sono uniformi nei tre piani dello spazio. La crescita trasversale della mascella, che rappresenta il primo processo di crescita a completarsi, prosegue fino alla comparsa dei primi ponti ossei a livello della sutura palatina mediana. Ciò implica che, in molti soggetti, l'accrescimento trasversale si conclude già nelle prime fasi dell'adolescenza. Secondo Bishara et al., la distanza intercanina mascellare aumenta mediamente di circa 6 mm tra i 3 e i 13 anni, per poi ridursi successivamente, mentre la distanza intermolarare aumenta di circa 2 mm nello stesso periodo. Diversamente, la sutura mediana mandibolare si ossifica già nei primi mesi di vita e l'arcata mandibolare raggiunge una sostanziale stabilità entro gli 8 anni di età [85].

La crescita sagittale della mascella e della mandibola tende invece a proseguire fino alla media o tarda adolescenza, rendendo talvolta non indispensabile un intervento particolarmente precoce. Secondo Nanda e Ghosh, la crescita mascellare è più intensa tra i 6 e i 12 anni nelle femmine e tra i 12 e i 18 anni nei maschi. Per quanto riguarda la mandibola, la crescita longitudinale si arresta quasi completamente entro

2-3 anni dal menarca nelle femmine, mentre nei maschi continua generalmente almeno fino ai 18 anni [86].

La crescita verticale rappresenta il processo che si conclude più tardivamente. Nelle femmine può protrarsi fino alla tarda adolescenza, mentre nei maschi può continuare oltre i 20 anni. Alcuni studi hanno addirittura documentato incrementi verticali residui fino alla quarta decade di vita [87,88].

Attualmente, tra tutti gli indicatori biologici disponibili, l'età scheletrica è considerata il parametro più affidabile per identificare con buona precisione l'inizio della pubertà, il periodo del picco di crescita e la fase conclusiva dell'accrescimento. Il processo di crescita presenta infatti una fase iniziale molto rapida nei primi due anni di vita, seguita da un periodo di rallentamento di durata variabile in base al sesso. Successivamente si verifica una nuova accelerazione fino al raggiungimento del picco puberale, seguita da una progressiva riduzione della velocità di crescita fino alla maturità scheletrica. Poiché l'inizio, la durata e l'intensità di queste fasi variano notevolmente da individuo a individuo, la valutazione dell'età scheletrica assume un ruolo clinico fondamentale.

L'età scheletrica può essere determinata mediante diverse metodiche diagnostiche, tra cui la radiografia della mano e del polso, l'analisi delle vertebre cervicali oppure la valutazione dello stadio di maturazione della sutura palatina mediana [89–94].

1.5.2. Metodi per la valutazione dell'età scheletrica

1.5.2.1. Rx carpale

In ambito ortodontico, la radiografia del carpo rappresenta uno degli strumenti più utilizzati per la valutazione della maturazione scheletrica. Questo esame consente di visualizzare la mano, il polso e le epifisi distali di radio e ulna, offrendo numerosi vantaggi: è di semplice esecuzione, comporta un'esposizione minima ai raggi X e permette l'osservazione di molteplici centri di ossificazione facilmente identificabili, che compaiono secondo una precisa sequenza cronologica. Inoltre, consente di valutare il grado di maturazione ossea attraverso l'osservazione del processo di fusione tra epifisi e diafisi. Tra i principali sistemi di interpretazione

delle radiografie carpali si ricordano quelli proposti da Greulich e Pyle, Gianni e Bjork.

Greulich e Pyle [95] realizzarono un atlante costituito da radiografie di mano e polso ottenute in soggetti dall'età neonatale fino all'età adulta, eseguite a intervalli trimestrali. Il metodo consiste nel confrontare la radiografia della mano sinistra del paziente con le immagini standard presenti nell'atlante, suddivise per sesso ed età. La valutazione si basa sul confronto del numero, della forma, delle dimensioni e dei rapporti reciproci delle strutture ossee. Se correttamente applicato, questo sistema permette di stimare l'età scheletrica con un'approssimazione di circa tre mesi.

Gianni [96] mise in relazione la crescita staturale con l'età cronologica, osservando un primo incremento significativo della crescita intorno ai sette anni e un picco principale compreso tra i 12 e i 14 anni nei maschi e tra i 10 e i 12 anni nelle femmine. Dopo il raggiungimento del picco, la velocità di crescita diminuisce rapidamente fino a valori prossimi allo zero. Integrando tali osservazioni con l'analisi radiografica di mano e polso, l'autore individuò sei differenti periodi maturativi:

- **I Periodo:** sono visibili trapezoide, grande osso, uncinato, semilunare e piramidale. Questa fase coincide con la permuta degli incisivi ed è caratterizzata dalla massima velocità relativa di crescita.
- **II Periodo:** compaiono trapezio e scafoide. La velocità di crescita rallenta progressivamente (8-12 anni nei maschi; 8-10 anni nelle femmine).
- **III Periodo:** si osservano l'apofisi stiloide dell'ulna e il pisiforme. Questa fase corrisponde all'inizio della crescita puberale ed è caratterizzata da un'accelerazione della velocità di crescita verso il picco massimo (12-12,5 anni nei maschi; 10-10,5 anni nelle femmine).
- **IV Periodo:** compare l'osso sesamoide. In questa fase viene raggiunta la massima velocità assoluta di crescita (12-14,5 anni nei maschi; 10-12,5 anni nelle femmine).
- **V Periodo:** si verifica la calcificazione delle cartilagini falangee e metacarpali. La velocità di crescita diminuisce progressivamente fino a valori prossimi allo zero (14,5-15 anni nei maschi; 12-13 anni nelle femmine).
- **VI Periodo:** la cartilagine distale del radio appare completamente calcificata. Questo stadio coincide con l'esaurimento della crescita staturale

e cranio-facciale (oltre i 15 anni nei maschi e oltre i 13 anni nelle femmine, nelle quali il menarca è imminente o già avvenuto).

Bjork [97] propose invece una classificazione basata sull'analisi delle falangi delle dita della mano. Le dita vengono numerate da 1 a 5 partendo dal pollice, mentre le falangi sono indicate come PP (falange prossimale), MP (falange media) e DP (falange distale). Gli stadi individuati sono i seguenti:

- **Stadio PP2:** nella falange prossimale dell'indice l'epifisi ha una larghezza pari a quella della diafisi.
- **Stadio S:** comparsa dell'osso sesamoide del pollice. Questo momento coincide con l'inizio della fase di massima accelerazione della crescita (circa 12 anni nei maschi e 10 anni nelle femmine).
- **Stadio MP3 Capping:** nella falange media del terzo dito l'epifisi si ispessisce e supera lateralmente la diafisi (circa 14 anni nei maschi e 12 anni nelle femmine).
- **Stadio PP1 Capping:** nella falange prossimale del pollice l'epifisi assume un aspetto a "casco rovesciato", sovrastando la diafisi.
- **Stadio DP3 U:** nella falange distale del terzo dito si osserva la fusione tra epifisi e diafisi. Questo stadio segna l'inizio della fase post-puberale e coincide con il termine della crescita del mascellare superiore.
- **Stadio MP3 U:** nella falange media del terzo dito si completa la fusione tra epifisi e diafisi (circa 15 anni nei maschi e 13 anni nelle femmine).
- **Stadio RU:** fusione completa dell'epifisi radiale con il radio. Questo stadio corrisponde al completamento della crescita corporea (circa 18 anni nei maschi e 16 anni nelle femmine).

Nella classificazione di Bjork, la fase di *Capping* indica che il picco di crescita è già stato superato, sebbene una certa quantità di crescita residua sia ancora presente fino alla completa calcificazione dell'epifisi distale del radio. Per questo motivo, particolare importanza viene attribuita all'osservazione della falange media del terzo dito, poiché lo stadio MP3 Capping rappresenta il principale indicatore del superamento del picco di crescita.

Proprio sulla base di questa osservazione è stato sviluppato il metodo MPM (*Middle Phalanx Maturation*), che prevede la valutazione esclusiva della falange media del dito medio mediante una singola radiografia [90,98].

Il metodo MPM identifica sei stadi di maturazione (Fig. 9), suddivisi in due fasi prepuberali (MPS1 e MPS2), due puberali (MPS3 e MPS4) e due postpuberali (MPS5 e MPS6):

- **MPS1:** l'epifisi è più stretta della metafisi oppure presenta la stessa larghezza ma con margini laterali assottigliati e arrotondati. Non vi è fusione tra epifisi e metafisi. Questo stadio si osserva fino a circa un anno prima dell'inizio del picco puberale.
- **MPS2:** l'epifisi ha raggiunto una larghezza pari o superiore a quella della metafisi. I margini laterali appaiono più spessi e ben definiti, formando un angolo retto con la metafisi. La fusione non è ancora iniziata. Questo stadio precede il picco puberale e dura generalmente meno di un anno.
- **MPS3:** l'epifisi mantiene una larghezza almeno pari a quella della metafisi e mostra un iniziale fenomeno di "incappucciamento" (*capping*). Non è ancora presente fusione. Questo stadio coincide con il raggiungimento del picco puberale e dura meno di un anno.
- **MPS4:** inizia la fusione tra epifisi e metafisi, pur rimanendo ancora distinguibili i contorni dell'epifisi. L'incappucciamento è chiaramente visibile e i margini laterali formano angoli ottusi. Questo stadio corrisponde alla fase di decelerazione successiva al picco massimo di crescita e ha una durata inferiore a un anno.
- **MPS5:** la fusione tra epifisi e metafisi è quasi completa, sebbene non ancora totale. I contorni dell'epifisi diventano progressivamente meno riconoscibili. Questa fase coincide con la conclusione del picco puberale e dura pochi mesi.
- **MPS6:** la fusione tra epifisi e metafisi è completa e il contorno dell'epifisi non è più distinguibile. Questo stadio indica il completamento definitivo del picco puberale e permane per tutta la vita.

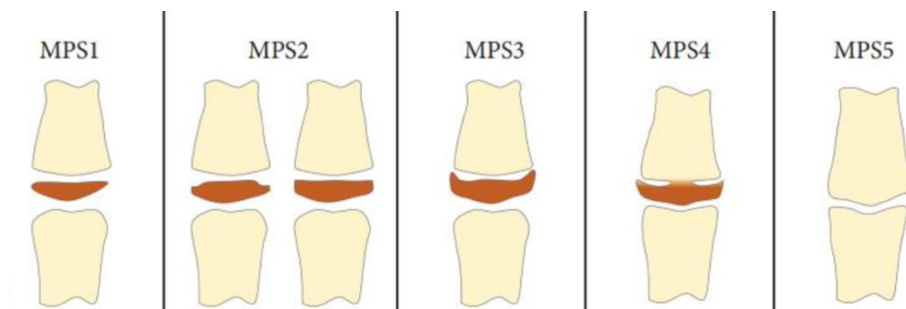


Figura 9 – Rappresentazione schematica degli stadi nel metodo MPM. (Perinetti G. *The Third Finger Middle Phalanx Maturation (MPM) Method to Assess Timing of Functional Treatment for Skeletal Class II Malocclusion: Report of Three Cases. Case Rep Dent.* 2019)

In presenza di differenze tra i due margini laterali, ai fini della stadiazione viene sempre considerato lo stadio più avanzato di maturazione [99].

1.5.2.2. Metodo delle vertebre cervicali

La valutazione della maturazione delle vertebre cervicali rappresenta un metodo particolarmente affidabile per determinare la fase di crescita del paziente. Questa metodica può essere applicata direttamente sulla teleradiografia latero-laterale del cranio, esame radiografico già previsto nella pianificazione del trattamento ortodontico, evitando pertanto l'esposizione del paziente a ulteriori dosi di radiazioni.

L'analisi si basa sull'osservazione delle vertebre cervicali, in particolare dell'epistrofeo (C2), della terza (C3) e della quarta vertebra cervicale (C4). In base alle modificazioni morfologiche di tali strutture vengono identificati sei stadi di maturazione (Fig. 10) [100]:

- In CS1 il margine inferiore dell'epistrofeo appare piatto, mentre C3 e C4 presentano una morfologia trapezoidale.
- In CS2 compare una concavità di circa 1 mm sul margine inferiore dell'epistrofeo e la porzione superiore di C2 assume una maggiore inclinazione.
- In CS3 è visibile una concavità anche al di sotto della seconda vertebra cervicale. C2 mantiene una forma trapezoidale, così come C3. In alcuni casi il margine superiore può apparire più appiattito, assumendo l'aspetto di un triangolo disposto orizzontalmente.
- In CS4 si osserva una concavità anche al di sotto della terza vertebra cervicale. La seconda e la terza vertebra assumono una forma quadrangolare.
- In CS5 la seconda vertebra cervicale presenta una forma rettangolare caratterizzata da un'altezza superiore alla larghezza.
- In CS6 tutte le vertebre mostrano una concavità sul margine inferiore. La seconda e la terza vertebra presentano una forma rettangolare con altezza maggiore rispetto alla larghezza.

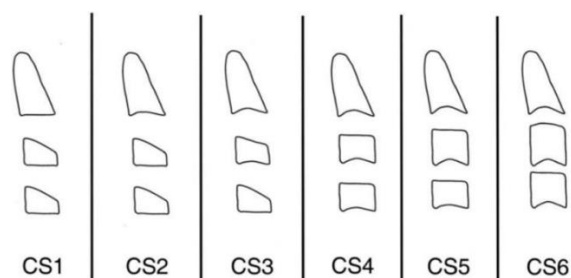


Figura 10 – Rappresentazione schematica degli stadi nella valutazione CVM secondo Baccetti. (Baccetti T, Franchi L, McNamara JA. *The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics*. Semin Orthod. 2005)

A ciascuno di questi stadi corrisponde una diversa fase del processo di crescita:

- Nei soggetti classificati come CS1, il picco di crescita puberale non si manifesterà prima di due anni.
- Nei soggetti in stadio CS2, il picco di crescita non si presenterà prima di un anno.
- I pazienti in stadio CS3 si trovano in corrispondenza del picco di crescita.
- I soggetti classificati come CS4 hanno appena superato il picco di crescita.
- Nei pazienti in stadio CS5 il processo di crescita è ancora presente ma risulta in progressiva diminuzione.
- I soggetti in stadio CS6 hanno completato il loro accrescimento.

Generalmente gli stadi CS1 e CS2 vengono considerati pre-puberale, gli stadi CS3 e CS4 corrispondono al periodo puberale, mentre gli stadi CS5 e CS6 appartengono alla fase post-puberale [101].

Attualmente il metodo delle vertebre cervicali rappresenta la tecnica più utilizzata per la valutazione dell'età scheletrica, grazie alla sua elevata affidabilità diagnostica, sebbene in alcuni casi l'interpretazione delle immagini possa risultare complessa.

Il metodo MPM ha dimostrato una buona concordanza diagnostica con il metodo CVM, rendendo le due metodiche sostanzialmente intercambiabili anche nello stesso paziente. Questo aspetto risulta particolarmente vantaggioso nella pratica clinica, poiché la stadiazione può essere effettuata inizialmente mediante il metodo CVM, durante la fase diagnostica, e successivamente monitorata tramite il metodo MPM fino all'inizio e al completamento del picco di crescita puberale. La concordanza globale tra i due metodi è pari al 77%; nei soggetti di sesso femminile

raggiunge valori massimi del 97,6% per la corrispondenza MPS1/CS1, mentre nei soggetti di sesso maschile arriva fino al 90,6% per la stessa associazione tra stadi [101].

1.5.2.3. Stadiazione della maturazione della sutura palatina mediana

La valutazione dello stadio di maturazione della sutura palatina mediana riveste un ruolo fondamentale nell'identificazione dei pazienti adolescenti e giovani adulti candidabili al trattamento mediante espansione rapida del mascellare (RME, Rapid Maxillary Expansion), procedura che rappresenta un'alternativa meno invasiva rispetto all'espansione chirurgicamente assistita [6].

L'inizio e la progressione del processo di fusione della sutura palatina mediana presentano un'elevata variabilità individuale, influenzata da molteplici fattori, tra cui età e sesso. Per questo motivo, il grado di maturazione della sutura non può essere correlato in modo diretto all'età cronologica del paziente [40].

Angelieri et al. [6] hanno proposto una classificazione basata sulla valutazione della sutura palatina mediana mediante esame CBCT. Tale sistema distingue differenti stadi maturativi in funzione del grado di fusione suturale (Fig. 11):

- Nello stadio A la sutura appare come una linea pressoché rettilinea ad elevata intensità radiografica, caratterizzata dall'assenza o dalla minima presenza di interdigitazioni.
- Nello stadio B la sutura assume un andamento irregolare e ondulato, mantenendo un'elevata intensità radiografica. Possono essere osservate piccole aree nelle quali due linee ondulate decorrono parallelamente, separate da una sottile zona a bassa intensità.
- Nello stadio C sono evidenti due linee parallele e ondulate ad alta intensità, separate da piccoli spazi a bassa intensità. La sutura può presentarsi sia rettilinea sia irregolare e si estende dal forame incisivo fino alla sutura palatina trasversa.
- Nello stadio D la fusione è già avvenuta nella porzione posteriore della sutura. A livello dell'osso palatino la sutura non è più distinguibile ed è presente un aumento della densità parasuturale. Nella regione dell'osso

mascellare sono invece ancora riconoscibili due linee ondulate parallele ad alta densità, separate da aree a minore densità.

- Nello stadio E la sutura non è più identificabile neppure a livello dell'osso mascellare. Si osserva inoltre un incremento della densità parasuturale anche nella regione mascellare.

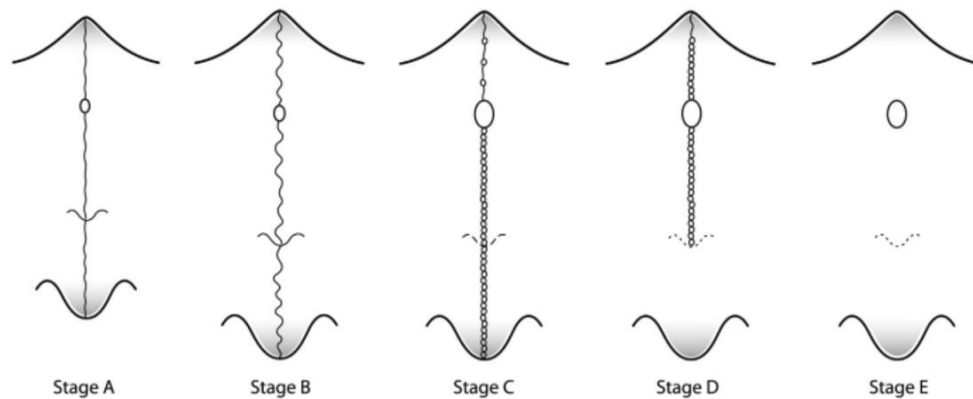


Figura 11 – Disegno schematico delle fasi di maturazione della sutura palatina mediana. (Angelieri F, Cevidanes LHS, Franchi L, Gonçalves JR, Benavides E, McNamara JA. Midpalatal suture maturation: classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2013)

Numerosi studi hanno evidenziato una correlazione tra la maturazione della sutura palatina mediana e la crescita scheletrica, dimostrata dall'elevata associazione riscontrata tra gli stadi di maturazione vertebrale cervicale e quelli della sutura palatina mediana. In particolare, gli stadi cervicali prepuberali (CS1 e CS2) risultano generalmente associati agli stadi A e B della maturazione suturale. Durante la fase puberale, corrispondente allo stadio CS3, la sutura palatina mediana si presenta frequentemente allo stadio C di maturazione. La presenza di numerose interdigitazioni ossee tipica di questo stadio conferma quanto osservato da Baccetti et al., i quali hanno rilevato effetti scheletrici più favorevoli dell'espansione rapida del mascellare nei pazienti prepuberali rispetto a quelli postpuberali [102].

Krukemeyer [103], nel 2013, ha inoltre analizzato il rapporto tra la risposta al trattamento con RME, gli stadi di maturazione della sutura palatina mediana e quelli della maturazione vertebrale cervicale. I risultati hanno evidenziato una relazione inversa tra maturazione scheletrica ed espansione suturale: quanto minore è il grado di maturazione del paziente, tanto maggiore risulta l'apertura della sutura, con una predominanza degli effetti scheletrici rispetto a quelli dentoalveolari.

La fusione della porzione posteriore della sutura palatina mediana, localizzata a livello dell'osso palatino, limita significativamente l'efficacia degli espansori

convenzionali. Di conseguenza, negli stadi A e B è generalmente indicato l'impiego di un espansore palatale convenzionale. Lo stadio C rappresenta invece una fase di transizione, nella quale l'utilizzo di un espansore tradizionale può risultare meno prevedibile. Negli stadi D ed E, infine, è preferibile ricorrere a dispositivi assistiti da miniviti oppure a procedure chirurgicamente assistite, poiché il grado di oblitterazione suturale risulta tale da ostacolare l'azione dell'espansore rapido del mascellare [37,38,40–43,104].

1.6. Espansione mascellare

1.6.1. Classificazione degli espansori

In presenza di un deficit trasversale del mascellare superiore, il trattamento di riferimento consiste nell'espansione scheletrica dell'arcata mascellare. Attraverso la separazione delle suture cranio-facciali è possibile indurre processi di neoformazione ossea; in particolare, l'apertura della sutura palatina mediana consente di aumentare la dimensione trasversale di un mascellare superiore iposviluppato.

Nella pratica ortodontica contemporanea gli espansori possono essere classificati in base al tipo di ancoraggio utilizzato. Si distinguono pertanto espansori a esclusivo supporto dentale (tooth-borne), dispositivi a supporto dentale e mucoso (tooth- and tissue-borne), espansori ad ancoraggio esclusivamente scheletrico (bone-borne) ed espansori ibridi che sfruttano contemporaneamente il supporto dentale e quello scheletrico (tooth- and bone-borne).

1.6.2. Espansori tooth borne e tooth-tissue borne

1.6.2.1. Caratteristiche e differenze

Gli espansori tooth-borne sono dispositivi che utilizzano esclusivamente i denti come elemento di ancoraggio. Gli espansori tooth- and tissue-borne, invece, associano al supporto dentale una componente in resina che si appoggia alla mucosa

palatale e alveolare. Tra i principali dispositivi tooth-borne rientrano gli espansori di Isaacson e Hyrax, mentre tra quelli tooth- and tissue-borne si annoverano il disgiuntore rapido di Derichsweiler e quello di Haas.

L'espansore di Isaacson è costituito da una struttura metallica che sostituisce la tradizionale placca in resina acrilica. I primi premolari e i primi molari vengono bandati e collegati rigidamente al framework metallico. Il dispositivo è dotato di una molla elicoidale che viene attivata mediante la chiusura di un dado, determinando la compressione della molla stessa.

L'espansore Hyrax è formato da un framework metallico al quale sono saldate bande applicate a premolari e molari. Al centro della struttura è presente una vite di espansione di tipo Hyrax che consente l'attivazione del dispositivo.

Il Leaf Expander rappresenta un apparecchio per l'espansione del mascellare superiore che agisce attraverso un rimodellamento dentoalveolare ottenuto mediante forze leggere, continue e predeterminate sia per intensità sia per direzione. Nei pazienti più giovani questo dispositivo può esercitare anche un effetto di tipo ortopedico.

Il disgiuntore di Derichsweiler è caratterizzato dalla presenza di elementi in filo metallico saldati alle bande che permettono il collegamento della placca acrilica al palato e alle superfici dei denti non bandati.

L'espansore di Haas è costituito da bande cementate sui primi premolari e sui primi molari, associate a una placca palatale in resina acrilica a stretto contatto con la mucosa. Un filo in acciaio inox da 0,045 pollici decorre lungo le superfici palatali dei denti coinvolti, mentre un secondo filo di rinforzo, disposto vestibolarmente, conferisce maggiore rigidità all'intera struttura [105,106].

Numerosi studi hanno confrontato gli effetti degli espansori tooth-borne con quelli dei dispositivi tooth- and tissue-borne. Garib et al. [15], attraverso analisi tomografiche, hanno valutato gli effetti dentoscheletrici delle due tipologie di apparecchiatura. I risultati hanno mostrato che entrambe determinano un incremento delle dimensioni trasversali e producono effetti ortopedici sostanzialmente sovrapponibili. In entrambi i casi l'espansione è associata a un'inclinazione vestibolare degli elementi dentali posteriori superiori; tuttavia, gli espansori tooth- and tissue-borne sembrano indurre modificazioni assiali più marcate a carico dei denti posteriori, in particolare dei secondi premolari.

1.6.2.2. Protocolli di attivazione

Per l'espansione del mascellare superiore sono stati proposti diversi approcci clinici, riconducibili principalmente a due protocolli di attivazione: l'espansione palatale rapida e l'espansione palatale lenta.

L'espansione palatale rapida si fonda sull'applicazione ai denti posteriori di forze elevate, continue e attivate in tempi brevi. L'intensità della forza determina una marcata ialinizzazione dei tessuti parodontali, limitando lo spostamento dentale e favorendo il trasferimento diretto delle sollecitazioni alla sutura palatina mediana, con conseguente apertura della stessa. Questo meccanismo consente di ottenere un reale incremento della base scheletrica mascellare e un aumento della dimensione trasversale ossea, riducendo al minimo i movimenti dentali indesiderati nei pazienti con deficit trasversale del mascellare superiore.

Nella sua configurazione più comune, l'espansione palatale rapida viene realizzata mediante una vite centrale attivata due volte al giorno. Ogni attivazione corrisponde generalmente a un quarto di giro, equivalente a circa 0,25 mm; si ottiene pertanto un'espansione di circa 0,5 mm al giorno, per un incremento complessivo che può raggiungere circa 1 cm nell'arco di due o tre settimane. Lo scopo di questi dispositivi è ottenere la separazione della sutura palatina nel minor tempo possibile, applicando forze ortopediche comprese tra 5 e 10 kg.

Lo spazio creato dall'apertura della sutura viene inizialmente occupato da fluido tissutale ed ematico. In questa fase la stabilità dell'espansione è limitata; per tale motivo il dispositivo deve essere mantenuto in sede e bloccato per almeno quattro mesi, così da consentire la formazione di nuovo tessuto osseo e la stabilizzazione del risultato ottenuto.

Dal punto di vista clinico, l'avvenuta apertura della sutura palatina mediana è generalmente segnalata dalla comparsa di un diastema tra gli incisivi centrali superiori. Durante la fase di consolidamento osseo questo spazio tende a chiudersi spontaneamente grazie all'elasticità delle fibre transettali: inizialmente si osserva la chiusura a livello coronale, generalmente entro il primo mese, mentre la chiusura radicolare richiede tempi più lunghi, spesso nell'ordine di circa quattro mesi.

Nei mesi successivi al trattamento si verifica fisiologicamente una certa recidiva della componente scheletrica dell'espansione, compensata tuttavia da un incremento della componente dentale. Di conseguenza, la quantità totale di

espansione ottenuta rimane sostanzialmente invariata, pur modificandosi il contributo relativo delle componenti scheletrica e dentoalveolare: nelle fasi iniziali prevale l'effetto ortopedico, mentre successivamente aumenta il contributo del movimento dentale.

L'espansione palatale lenta prevede invece una velocità di attivazione inferiore a 2 mm alla settimana e l'applicazione di forze più contenute, generalmente comprese tra 0,9 e 1,8 kg. In queste condizioni l'apertura della sutura avviene con una velocità simile a quella della neoformazione ossea, favorendo un adattamento progressivo dei tessuti. L'apertura suturale può essere documentata radiograficamente, mentre generalmente non compare il diastema interincisivo caratteristico dell'espansione rapida.

A differenza dell'espansione rapida, nell'espansione lenta la quota di espansione ottenuta è fin dall'inizio distribuita in maniera pressoché equivalente tra componente scheletrica e componente dentale.

Dopo circa 10-12 settimane di trattamento, i risultati ottenuti in termini di espansione dentale e scheletrica risultano sostanzialmente comparabili a quelli raggiunti mediante espansione rapida [45].

Il confronto tra i due protocolli ha evidenziato una maggiore espansione della distanza intercanina nei pazienti trattati con espansione rapida [107]. Per quanto riguarda invece l'espansione della regione posteriore del palato, studi con follow-up a lungo termine hanno mostrato incrementi del perimetro dell'arcata mascellare sostanzialmente sovrapponibili tra i due protocolli terapeutici [108,109].

1.6.3. Espansori bone borne e tooth-bone borne

1.6.3.1. Espansione palatale supportata da miniviti

La progressiva fusione delle suture palatine rappresenta una delle principali difficoltà nel trattamento dei pazienti che hanno superato il picco di crescita e presentano ancora una discrepanza trasversale del mascellare superiore. Durante il periodo prepuberale, infatti, la ridotta resistenza delle suture consente di ottenere una correzione scheletrica efficace mediante dispositivi ad ancoraggio dentale, con limitati effetti indesiderati sugli elementi dentari. Con l'avanzare della maturazione

scheletrica, invece, la gestione dell'ancoraggio durante l'espansione richiede strategie differenti [12,110].

Nei soggetti caratterizzati da una maggiore maturazione della sutura palatina mediana è necessario applicare forze espansive più elevate per ottenere la separazione suturale. In queste condizioni, l'impiego di dispositivi tooth-borne tende a produrre effetti sempre meno scheletrici e sempre più dentoalveolari, aumentando il rischio di complicanze che possono variare da una semplice sintomatologia dolorosa fino a fenomeni di riassorbimento a carico dei denti utilizzati come ancoraggio.

In presenza di un'elevata resistenza suturale, gli espansori tradizionali determinano infatti una limitata espansione scheletrica trasversale del mascellare superiore e una marcata inclinazione vestibolare dei denti di supporto. A ciò possono associarsi alterazioni dello spessore e dell'altezza della corticale vestibolare, compromissione dell'integrità dento-parodontale degli elementi di ancoraggio e possibili fenomeni di riassorbimento radicolare [110–113].

L'introduzione delle miniviti nelle procedure espansive ha consentito di ridurre significativamente tali effetti indesiderati, poiché la forza di espansione viene trasmessa direttamente all'osso basale del mascellare anziché essere applicata esclusivamente ai denti. Gli espansori supportati da miniviti possono essere suddivisi in due principali categorie. I dispositivi definiti “Hybrid” presentano un ancoraggio misto, scheletrico e dentale (tooth-bone-borne), coinvolgendo generalmente i primi molari permanenti oltre alle miniviti. Gli espansori “Bone-Borne”, invece, utilizzano esclusivamente un ancoraggio scheletrico mediante miniviti, senza alcun coinvolgimento diretto degli elementi dentari [112,114,115].

1.6.3.2. TADs: dispositivi temporanei di ancoraggio

a. Struttura delle miniviti ortodontiche

I dispositivi di ancoraggio temporaneo, comunemente indicati con l'acronimo TADs (Temporary Anchorage Devices), sono oggi ampiamente impiegati nella pratica ortodontica grazie alla loro elevata predicibilità clinica e ai numerosi vantaggi che offrono in termini di ancoraggio. Tra i TADs maggiormente utilizzati rientrano miniviti, microviti, mini-impianti, impianti palatali, placche ossee

modificate e impianti retromolari. Questi dispositivi sono progettati per permanere temporaneamente nel cavo orale e fornire un ancoraggio stabile a carico immediato, necessario per ottenere gli spostamenti dentali desiderati.

A differenza degli impianti protesici, i TADs non si basano sull'osteointegrazione per garantire la loro efficacia clinica, ma sfruttano la cosiddetta stabilità primaria o meccanica. Tale stabilità è determinata dalla ritenzione meccanica ottenuta al momento dell'inserimento della vite nell'osso e dipende dal raggiungimento di un torque di inserimento ottimale, generalmente compreso tra 10 e 15 Nmm [116].

L'intimo contatto tra il dispositivo e il tessuto osseo consente l'applicazione immediata delle forze ortodontiche necessarie al trattamento [117]. A livello dell'interfaccia osso-impianto non si osservano infiltrati infiammatori significativi e, già dopo un giorno dall'inserimento, è possibile rilevare fenomeni di mineralizzazione ossea a contatto con l'impianto e la presenza di osteoblasti sulla sua superficie [118].

La stabilità primaria delle minivite è influenzata da diversi fattori:

- **Qualità e quantità dell'osso:** numerosi studi hanno evidenziato l'importanza della densità ossea e dello spessore della corticale nel determinare la stabilità primaria. Una maggiore densità ossea è associata a una migliore stabilità meccanica, mentre un maggiore spessore corticale si correla a percentuali di successo più elevate. Per questo motivo, la valutazione preliminare delle caratteristiche ossee del sito di inserimento rappresenta una fase fondamentale della pianificazione terapeutica [119,120].
- **Design del dispositivo:** tra le caratteristiche strutturali associate a una maggiore stabilità primaria figurano la forma conica della vite, un diametro esterno maggiore, una lunghezza più elevata e la presenza di un abutment, elemento che consente l'applicazione delle forze ortodontiche [121].
- **Presenza di mucosa cheratinizzata:** la cheratinizzazione conferisce all'epitelio maggiore resistenza e stabilità nei confronti delle abrasioni e delle forze meccaniche. La presenza di gengiva aderente cheratinizzata attorno alla minivite è particolarmente importante per limitare i traumi ai tessuti marginali e ridurre il rischio di infiammazione, più frequente invece nelle aree caratterizzate da mucosa alveolare [122].

- **Torque di inserimento:** una buona stabilità primaria si ottiene generalmente con valori di torque pari a circa 15 Nmm [116]. Il torque aumenta all'aumentare della rigidità della corticale ossea e del diametro della vite. Valori più elevati si associano a una maggiore stabilità primaria, mentre torque insufficienti possono determinare mobilità e instabilità del dispositivo.
- **Protocollo di inserimento:** anche la tecnica di inserimento influenza la stabilità primaria [123]. Le miniviti self-tapping richiedono la realizzazione preventiva di un foro pilota (pre-drilling), mentre le viti self-drilling possono essere inserite direttamente applicando pressione sulla corticale e avvitando il dispositivo con gli strumenti dedicati. Studi in vitro hanno evidenziato una maggiore resistenza alle forze di dislocazione per le miniviti inserite mediante protocollo self-drilling [124].
- **Forza applicata e tempi di carico ortodontico:** la letteratura scientifica suggerisce che differenti protocolli di carico siano in grado di garantire un'adeguata stabilità primaria delle miniviti [120,125,126].

Le miniviti ortodontiche presentano generalmente una superficie liscia, ottenuta attraverso un processo di tornitura. Tale caratteristica è legata al fatto che questi dispositivi non sono progettati per osteointegrarsi, ma per mantenere una stabilità sufficiente durante il periodo necessario al trattamento ortodontico [123] (Fig. 12). I materiali impiegati nella produzione dei TADs devono possedere requisiti specifici, tra cui biocompatibilità, adeguate proprietà meccaniche e capacità di interagire favorevolmente con il tessuto osseo. Il materiale più utilizzato è il titanio, grazie alle sue eccellenti proprietà di resistenza meccanica, basso peso specifico, ridotta conducibilità termica, elevata resistenza alla corrosione, facilità di lavorazione, bioinerzia e biocompatibilità.

Dal punto di vista strutturale, una minivite è costituita da tre componenti principali: testa, collo e corpo. La testa rappresenta la porzione esposta all'interno del cavo orale dopo l'inserimento e può assumere una configurazione a bracket oppure sferica. Il corpo può presentare una forma cilindrica o conica; quest'ultima è oggi preferita poiché associata a valori di torque di inserimento più elevati [127]. Il collo corrisponde invece alla porzione di raccordo tra testa e corpo.

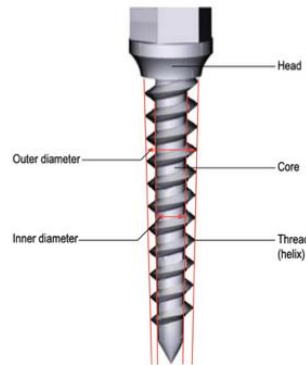


Figura 12- Parts of a bone screw (Ludwig B, Glasl B, Bowman SJ, Wilmes B, Kinzinger GS, Lisson JA. *Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites. J Clin Orthod.* 2011 Aug;45(8):433-41; quiz 467. PMID: 22094724.)

Le miniviti utilizzate in ortodonzia presentano generalmente una lunghezza compresa tra 6 e 15 mm e un diametro variabile tra 1,5 e 2 mm. L'aumento del diametro determina un incremento sia del torque di inserimento sia della stabilità primaria. Inoltre, il diametro influenza significativamente anche la resistenza alla frattura: ogni incremento di un decimo di millimetro comporta infatti un aumento rilevante della resistenza meccanica del dispositivo [128].

Anche la geometria delle spire svolge un ruolo importante nella stabilità primaria. In particolare, il Thread Shape Factor (TSF) esprime il rapporto percentuale tra la profondità media delle spire e il passo della vite. Questo parametro descrive le caratteristiche geometriche e meccaniche del dispositivo e influisce direttamente sulla sua resistenza all'estrazione [129].

b. Siti di inserimento delle miniviti

Per quanto riguarda i siti di inserimento delle miniviti, il palato duro è considerato una delle sedi più favorevoli grazie alla presenza di una corticale ossea spessa, di un'ampia quantità di gengiva aderente e alla ridotta probabilità di interferire con le

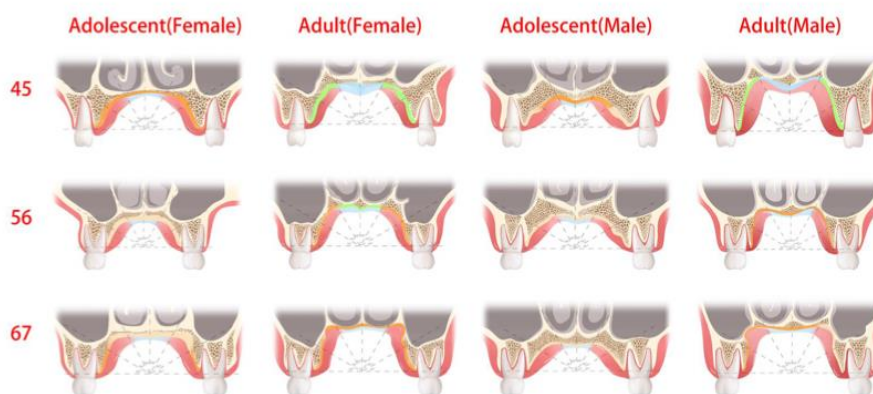


Figura 13 – Mappa dei siti ottimali per l'inserimento delle miniviti ortodontiche nel palato. Le regioni verdi e blu rappresentano i siti ottimali, caratterizzati da uno spessore dei tessuti molli inferiore a 2 mm o da una densità dell'osso corticale corrispondente ai tipi I e II. Le regioni giallo scuro rappresentano i siti raccomandati, caratterizzati da una qualità ossea di tipo III. (Zhu Z, Zhong L, Zhao Y, Wang X, Qian W, Ye N. Mapping optimal orthodontic implant sites in the palate using cone-beam computed tomography. *Front Oral Health*. 2024;5:1453665. doi:10.3389/froh.2024.1453665.)

radici dentali [130]. La regione anteriore del palato rappresenta l'area caratterizzata dal maggiore spessore osseo. In uno studio condotto mediante CBCT su soggetti in età pediatrica e adulta, Gracco et al. [131] hanno rilevato nella porzione anteriore del palato uno spessore compreso tra 4 e 8 mm.

La valutazione preventiva della quantità di osso disponibile a livello palatale è di fondamentale importanza, poiché una sovrastima dello spessore osseo potrebbe determinare la perforazione del pavimento delle cavità nasali. Nella regione anteriore del palato è possibile utilizzare miniviti di maggiore lunghezza, mentre procedendo posteriormente la lunghezza del dispositivo deve essere progressivamente ridotta [132].

La letteratura identifica la terza ruga palatina come principale riferimento anatomico per il posizionamento delle miniviti [133]. La sede di inserimento considerata ottimale è generalmente la regione paramediana del palato. Nei soggetti in crescita, tuttavia, è necessario prestare particolare attenzione a questa zona a causa della possibile incompleta ossificazione della sutura palatina mediana. Un'ulteriore area frequentemente utilizzata è quella compresa tra il quinto e il sesto

elemento dentario, corrispondente alla regione situata tra il secondo premolare e il primo molare.

Nel corso dell'inserimento delle miniviti palatali è inoltre necessario considerare il decorso dell'arteria palatina maggiore, ramo dell'arteria mascellare interna. Un eventuale danno a tale vaso può comportarne la retrazione elastica verso l'interno, rendendo difficile il controllo dell'emorragia mediante clampaggio.

L'ancoraggio scheletrico ottenuto a livello palatale trova impiego in numerose procedure ortodontiche, tra cui distalizzazioni dentali, intrusioni, chiusura degli spazi ed espansione rapida del mascellare superiore [134].

Anche gli spazi interradicolari vestibolari rappresentano una sede potenzialmente idonea per l'inserimento delle miniviti. Tuttavia, la scelta di tali aree richiede un'attenta valutazione della lunghezza del dispositivo, delle esigenze biomeccaniche del trattamento e delle caratteristiche anatomiche individuali del paziente, poiché il rischio di fallimento risulta generalmente maggiore rispetto ad altre sedi di inserimento [135].

Ulteriori regioni considerate favorevoli per il posizionamento delle miniviti sono le aree edentule, il trigono retromolare mandibolare lungo la linea obliqua esterna e il tuber mascellare [136].

Per l'individuazione dei corretti punti di repere e delle coordinate di inserimento a livello del palato sono stati proposti due differenti protocolli: un protocollo radiografico e un protocollo anatomo-clinico.

- **Protocollo radiografico:** prevede l'identificazione della sede ideale di inserimento a circa 3–4 mm distalmente al forame incisivo e 3 mm lateralmente rispetto alla sutura palatina mediana.

- **Protocollo anatomo-clinico:** utilizza come riferimenti la sutura palatina mediana e i punti di contatto tra canini, premolari e molari. Le sedi considerate più favorevoli sono:

- l'area situata 2 mm lateralmente alla sutura palatina mediana in corrispondenza del punto di contatto tra canino e primo premolare, dove lo spessore osseo medio è pari a $8,7 \pm 2,3$ mm;

- l'area situata 2 mm lateralmente alla sutura palatina mediana in corrispondenza del punto di contatto tra primo e secondo premolare, dove lo spessore osseo medio è pari a $8,68 \pm 3,68$ mm.

È inoltre possibile il posizionamento delle miniviti a livello dell'osso alveolare palatale compreso tra le radici del secondo premolare e del primo molare. Questa opzione viene utilizzata meno frequentemente poiché lo spessore della mucosa, nonché la presenza di strutture vascolari e nervose, possono rappresentare fattori limitanti per l'inserimento del dispositivo [134].

c. Procedure di inserimento

Si distinguono due principali protocolli per l'inserimento delle miniviti ortodontiche: la procedura diretta e la procedura guidata mediante guide chirurgiche tridimensionali.

Nella procedura diretta risulta fondamentale un'accurata valutazione anamnestica, anatomica e biomeccanica, finalizzata alla scelta del sito di inserimento e della minivite più appropriata. La valutazione clinica deve essere integrata da un'analisi radiografica mediante ortopantomografia, CBCT o teleradiografia latero-laterale. Può inoltre essere utile la realizzazione di modelli di studio sui quali riportare l'asse degli elementi dentari e la linea muco-gengivale.

La procedura prevede inizialmente l'esecuzione di un'anestesia loco-regionale nel sito selezionato. Successivamente viene valutato lo spessore della mucosa sovrastante mediante uno strumento appuntito dotato di stop in gomma, generalmente utilizzato in endodonzia. Una volta determinati lo spessore della mucosa e quello dell'osso sottostante, si procede alla scelta della minivite, considerando che la porzione inserita nell'osso dovrebbe avere una lunghezza almeno pari a quella emergente.

In funzione delle caratteristiche anatomiche del sito e del tipo di dispositivo selezionato, è possibile utilizzare due differenti tipologie di miniviti:

- Miniviti self-tapping: richiedono la realizzazione preventiva di un foro pilota (pre-drilling) prima dell'inserimento.
- Miniviti self-drilling: vengono inserite direttamente esercitando una pressione sulla corticale e successivamente avvitate mediante gli strumenti dedicati, senza necessità di pre-foratura.

Nelle aree caratterizzate da una corticale relativamente sottile e da osso spugnoso meno denso è generalmente preferibile l'utilizzo di miniviti self-drilling. Al

contrario, nelle regioni con corticale più spessa e tessuto osseo particolarmente compatto può risultare indicato l'impiego di miniviti self-tapping, previa esecuzione del pre-drilling.

La fase successiva consiste nell'avvitamento della minivite, che può essere effettuato manualmente oppure mediante apposito manipolo. L'inserimento manuale offre il vantaggio di una maggiore sensibilità tattile durante la procedura. Non sono generalmente richieste particolari indicazioni post-operatorie; è tuttavia fondamentale istruire il paziente al mantenimento di un'adeguata igiene orale nella zona peri-implantare.

La procedura indiretta mediante guide chirurgiche 3D prevede invece una fase preliminare di progettazione digitale. Tale procedura si basa sulla sovrapposizione delle immagini radiografiche tridimensionali ottenute tramite CBCT, oppure della teleradiografia latero-laterale, con i modelli digitali delle arcate dentarie in formato STL.

Attualmente il posizionamento delle miniviti palatali mediante pianificazione digitale rappresenta il gold standard clinico. Per la progettazione sono necessari una CBCT o una teleradiografia latero-laterale e i modelli digitali delle arcate dentarie. Attraverso software dedicati, come OnyxCeph (Niederwaldstr 3, 09123 Chemnitz, Germany), è possibile sovrapporre i file STL alle immagini radiografiche dopo un'adeguata calibrazione, consentendo la simulazione virtuale dell'inserimento delle miniviti nella posizione ritenuta ideale.

La letteratura evidenzia che, nella valutazione dello spessore osseo entro 5 mm dalla sutura palatina mediana, non esistono differenze clinicamente rilevanti tra le misurazioni ottenute mediante CBCT e quelle ricavate dalla teleradiografia latero-laterale [137].

Definita la posizione ideale, viene selezionata la minivite da utilizzare, che dovrà corrispondere esattamente a quella impiegata durante l'intervento clinico. Mediante tecnologie di stampa 3D è quindi possibile realizzare un modello fisico della situazione progettata virtualmente, comprensivo degli alloggiamenti per gli analoghi implantari. Su tale modello viene costruita una guida chirurgica che consente di trasferire con precisione il progetto digitale al campo operatorio.

L'utilizzo delle guide chirurgiche permette di inserire i TADs nelle aree anatomicamente più favorevoli, riducendo il rischio di contatto o perforazione delle radici dentarie e migliorando l'accuratezza dell'intervento.

Grazie alla guida chirurgica, le miniviti vengono inserite nella cosiddetta “posizione ideale”, caratterizzata dalla maggiore disponibilità di tessuto osseo, dalla distanza di sicurezza rispetto alle radici dentarie e da una profondità e inclinazione predeterminate durante la fase di pianificazione digitale.



Figura 14 – Utilizzo di una mascherina termoformata con tubo guida per l’inserimento guidato di miniviti palatali. (A) Fotografia intraorale della guida realizzata e posizionata sull’arcata mascellare; (B) radiografia cefalometrica laterale con la guida, che evidenzia la posizione e la direzione di inserimento della minivite; (C) utilizzo della guida durante la fase chirurgica di inserimento; (D) radiografia cefalometrica laterale dopo l’inserimento della minivite. (Papadopoulos MA, editor: *Skeletal Anchorage in Orthodontic Treatment of Class II Malocclusion: Contemporary Applications of Orthodontic Implants, Miniscrew Implants and Miniplates*. 1st ed. Edinburgh, London, New York, Oxford, Philadelphia, St Louis, Sydney, Toronto: Mosby Elsevier; 2015. Fig. 16.5.)

1.6.3.3. Espansori ad ancoraggio scheletrico: ibridi e bone borne

La tecnica di ancoraggio palatale, basata sull’utilizzo di miniviti inserite nel palato a supporto di dispositivi ortodontici, rappresenta oggi una procedura ampiamente diffusa e consolidata nella pratica clinica ortodontica.

Numerosi studi hanno dimostrato che l’espansione mascellare ottenuta mediante dispositivi ad ancoraggio esclusivamente dentale è in grado di produrre effetti scheletrici stabili nel lungo termine principalmente nei soggetti in fase pre-puberale. Nei pazienti puberali e post-puberali, invece, l’aumentata resistenza delle suture circum-mascellari e della sutura palatina mediana determina una progressiva riduzione degli effetti ortopedici e una prevalenza degli effetti dento-alveolari [91,138].

L’introduzione delle miniviti palatali ha consentito di superare in larga misura tali limitazioni. Trasferendo direttamente le forze espansive all’osso basale mascellare, questi dispositivi permettono di ottenere una maggiore disgiunzione suturale e una riduzione degli effetti indesiderati a carico dei denti di ancoraggio, quali tipping vestibolare, deiscenze ossee e riassorbimenti radicolari.

È stato infatti dimostrato che l'espansione mascellare assistita da miniviti palatali è in grado di produrre effetti scheletrici significativi anche nei pazienti puberali e post-puberali, ampliando le possibilità terapeutiche in soggetti che in passato sarebbero stati candidati esclusivamente a procedure più invasive, come l'espansione mascellare chirurgicamente assistita (SARME) [139].

I dispositivi ad ancoraggio palatale possono essere suddivisi in due principali categorie: dispositivi tooth-bone borne, caratterizzati da un ancoraggio combinato dentale e scheletrico, e dispositivi bone-borne, che utilizzano esclusivamente un ancoraggio scheletrico mediante miniviti.

Tra i principali espansori ibridi (tooth-bone borne) si ricordano il MARPE (Mini-Implant Assisted Rapid Palatal Expansion) e l'Hybrid Hyrax RME.

Il MARPE appartiene alla categoria degli espansori tooth-bone borne poiché associa un ancoraggio scheletrico, ottenuto mediante quattro miniviti palatali, a un ancoraggio dentale realizzato attraverso bande applicate agli elementi posteriori. Le miniviti sono generalmente orientate verticalmente; tale configurazione richiede uno spazio sufficiente per l'accesso del manipolo a livello palatale, condizione che può risultare limitante nei pazienti con una volta palatina particolarmente alta e stretta.

Nonostante questa possibile difficoltà tecnica, numerosi studi hanno dimostrato che il MARPE consente una distribuzione più uniforme delle forze espansive rispetto ai tradizionali espansori ad ancoraggio esclusivamente dentale, riducendo la concentrazione delle forze a livello dell'osso alveolare vestibolare e dei denti di ancoraggio. Tale caratteristica favorisce una maggiore componente scheletrica dell'espansione e limita gli effetti dento-alveolari indesiderati.

Choi et al., in uno studio retrospettivo condotto su 20 giovani adulti trattati mediante MARPE, hanno osservato la comparsa di un diastema interincisivo e segni radiografici di apertura della sutura palatina mediana nell'87% dei casi. Risultati analoghi sono stati riportati da Lim et al. in un campione di 24 giovani adulti sottoposti allo stesso trattamento [140,141].

Successivamente è stata sviluppata una variante del MARPE, denominata MSE (Maxillary Skeletal Expander), con l'obiettivo di massimizzare ulteriormente gli effetti scheletrici dell'espansione (Fig. 15).

L'MSE prevede il posizionamento delle miniviti nella regione centrale del palato posteriore e il loro inserimento a una profondità tale da ottenere un ancoraggio bicorticale. In questa configurazione le miniviti attraversano sia la corticale palatina sia la corticale del pavimento delle fosse nasali, aumentando significativamente la stabilità del sistema e migliorando la trasmissione delle forze espansive alle strutture scheletriche del mascellare superiore [142].



Figura 15 A - Vista occlusale con dispositivo MSE. Adattata da: **Cantarella D, Karanxha L, Zanata P, Mummolo S, De Stefano A, Galanakis A, et al.** *Digital Planning and Manufacturing of Maxillary Skeletal Expander for Patients with Thin Palatal Bone. Med Devices (Auckl).* 2021;14:299–309.



Figura 15 B - Vista occlusale pre e post-espansione con dispositivo MARPE. Adattata da: **Marin CM, Benitez MC, Otazu A, Torres DM, Cotrin P, Pinzan-Vercelino CR, et al.** *Correlation of age and skeletal effects after miniscrew assisted rapid palatal expansion. J Clin Exp Dent.* 2023;15(3):e269–e276.

L'Hybrid Hyrax RME (Fig. 16) rappresenta un dispositivo di espansione mascellare a supporto ibrido, caratterizzato dalla presenza di due miniviti palatali inserite in posizione anteriore paramediana e di bande cementate sui primi molari permanenti. Rispetto ad altri espansori assistiti da miniviti, questo dispositivo richiede un numero inferiore di TADs; tuttavia, la connessione tra le miniviti e la struttura dell'apparecchio deve essere realizzata con elevata precisione al fine di garantire la corretta trasmissione delle forze espansive.

L'Hybrid Hyrax RME è stato introdotto da un gruppo di ortodontisti tedeschi, tra cui Pieter Dietrich, Björn Ludwig e Benedict Wilmes, con l'obiettivo iniziale di valutare i vantaggi di un ancoraggio combinato dentale e scheletrico associato all'utilizzo della maschera facciale nel trattamento delle malocclusioni di III Classe scheletrica.

Successivamente, il dispositivo ha trovato applicazione anche nel trattamento delle discrepanze trasversali del mascellare superiore, dimostrando caratteristiche particolarmente favorevoli nei pazienti in crescita. In questi soggetti, infatti, l'inserimento di miniviti in posizione più posteriore può risultare difficoltoso a

causa della limitata disponibilità di osso, mentre il palato anteriore rappresenta generalmente una sede caratterizzata da maggiore spessore osseo e da una migliore qualità dell'ancoraggio.

Inoltre, rispetto all'osso alveolare, il palato offre condizioni anatomiche più favorevoli per il posizionamento delle miniviti, grazie alla maggiore disponibilità di tessuto osseo, alla presenza di mucosa cheratinizzata e alla ridotta probabilità di interferenze con le radici dentarie. Per tali motivi, l'Hybrid Hyrax RME rappresenta una soluzione efficace e relativamente poco invasiva per ottenere un'espansione mascellare con una significativa componente scheletrica, soprattutto nei pazienti giovani [143].



Figura 16 – Hybrid Hyrax expander. (Papadopoulos MA, editor. *Skeletal Anchorage in Orthodontic Treatment of Class II Malocclusion: Contemporary Applications of Orthodontic Implants, Miniscrew Implants and Miniplates*. 1st ed. Edinburgh, London, New York, Oxford, Philadelphia, St Louis, Sydney, Toronto: Mosby Elsevier; 2015. Fig. 24.3C.)

Diversi studi hanno confrontato gli effetti biomeccanici degli espansori rapidi tradizionali con quelli dei dispositivi assistiti da miniviti, evidenziando come la presenza di un ancoraggio scheletrico favorisca una distribuzione più omogenea delle forze lungo l'intera sutura palatina mediana e riduca significativamente gli effetti indesiderati a carico dei denti di ancoraggio.

In particolare, il confronto tra espansori tooth-borne, bone-borne e MARPE (Fig. 17) ha evidenziato importanti differenze nella distribuzione dello stress e negli effetti dento-scheletrici prodotti.

Nel caso degli espansori tradizionali tooth-borne, i maggiori valori di stress risultano concentrati a livello dell'osso alveolare vestibolare dei denti di ancoraggio. Questa distribuzione delle forze determina una significativa

inclinazione vestibolare degli elementi dentari posteriori e una maggiore componente dento-alveolare dell'espansione.

Negli espansori bone-borne, invece, lo stress si concentra prevalentemente attorno alle miniviti e viene trasferito in misura limitata all'osso basale e alle suture circum-mascellari. Di conseguenza, gli effetti dento-alveolari risultano minimi, ma la trasmissione delle forze alla sutura palatina mediana può essere meno efficiente.

Il sistema MARPE presenta una distribuzione biomeccanica intermedia e particolarmente favorevole. Anche in questo caso il massimo stress si concentra attorno alle miniviti; tuttavia, le forze vengono successivamente distribuite in modo relativamente uniforme attraverso il complesso circum-mascellare e la sutura palatina mediana, favorendo una maggiore componente scheletrica dell'espansione. Dal punto di vista dento-alveolare, l'espansore bone-borne determina gli effetti collaterali più contenuti. Con il MARPE e con gli espansori tradizionali tooth-borne si osserva invece un certo grado di tipping vestibolare del primo premolare e del primo molare mascellare. Tuttavia, nel MARPE tale inclinazione risulta significativamente inferiore rispetto a quella osservata con gli espansori ad ancoraggio esclusivamente dentale.

Queste differenze possono essere spiegate dalla particolare conformazione anatomica del mascellare superiore, che presenta una morfologia triangolare. Quando la forza viene applicata a livello dentale, come negli espansori tooth-borne, si genera un momento flettente maggiore sulla sutura palatina mediana, facilitandone l'apertura. Al contrario, nei dispositivi bone-borne il punto di applicazione della forza è situato più vicino alla sutura stessa, con conseguente riduzione del momento flettente e necessità di applicare forze più elevate per ottenere la separazione suturale.

Alla luce di queste considerazioni, il MARPE rappresenta un valido compromesso tra efficacia scheletrica e controllo degli effetti collaterali dento-alveolari, consentendo una distribuzione favorevole delle forze espansive e una significativa riduzione dello stress a carico dell'osso alveolare vestibolare e dei denti di ancoraggio [140,144,145].

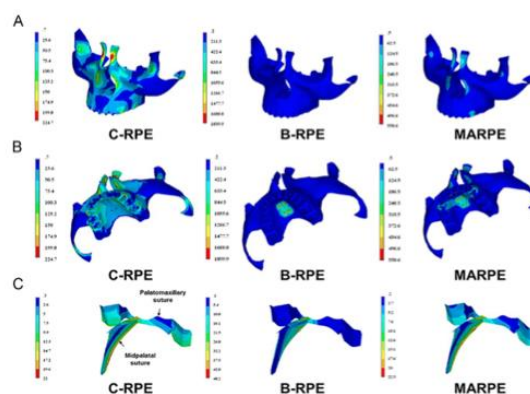


Figura 17 – Distribuzione dello stress (Von Mises stress) ottenuta mediante analisi agli elementi finiti (Finite Element Analysis, FEA) durante l'espansione mascellare con espansore convenzionale (C-RPE), espansore bone-borne (B-RPE) ed espansore assistito da miniviti (MARPE). Le aree rosse indicano una maggiore concentrazione dello stress, mentre le aree blu una minore concentrazione. (Lee KJ, Choi SH, Choi TH, Shi KK, Keum BT. Maxillary transverse expansion in adults: Rationale, appliance design, and treatment outcomes. *Semin Orthod.* 2018;24(1):59-69. doi:10.1053/j.sodo.2018.01.006.)

La vera espansione scheletrica, priva di effetti dento-alveolari indesiderati, può essere ottenuta esclusivamente mediante dispositivi ad ancoraggio scheletrico puro (bone-borne) (Fig. 18). In questi sistemi i denti non partecipano all'ancoraggio dell'apparecchiatura e, di conseguenza, non si osservano movimenti dentali di traslazione né fenomeni di tipping vestibolare associati all'attivazione dell'espansore.

Le forze espansive vengono infatti trasferite direttamente all'osso basale del mascellare superiore attraverso le miniviti, consentendo di massimizzare la componente scheletrica dell'espansione. Al termine del trattamento possono essere osservate soltanto lievi inclinazioni palatali spontanee degli elementi dentari posteriori, considerate un effetto secondario indiretto dell'espansione scheletrica e non della trasmissione diretta delle forze ai denti [12].

Il design dell'espansore riveste un ruolo fondamentale nel determinare l'efficacia biomeccanica del trattamento e nel raggiungimento degli effetti desiderati [146]. Sono state proposte diverse configurazioni degli espansori bone-borne, differenziate per numero, posizione e disposizione delle miniviti, nonché per le caratteristiche costruttive del dispositivo stesso.

Tra le configurazioni maggiormente studiate e considerate più vantaggiose vi è quella che prevede l'inserimento di quattro miniviti paramediane rispetto alla sutura palatina mediana. Tale configurazione sfrutta aree caratterizzate da adeguata disponibilità ossea e da una distanza di sicurezza favorevole rispetto alle strutture radicolari e vascolo-nervose.

In particolare, due miniviti vengono generalmente posizionate in corrispondenza della regione della terza ruga palatina, mentre le altre due vengono inserite posteriormente, nell'area interradicolare compresa tra il secondo premolare e il primo molare, a circa 6 mm apicalmente rispetto alla cresta alveolare. Questa disposizione consente di ottenere una distribuzione equilibrata delle forze espansive e una maggiore stabilità del dispositivo durante tutte le fasi del trattamento.



Figura 18 – Bone-borne appliance. (Annarumma F, Posadino M, De Mari A, et al. *Skeletal and dental changes after maxillary expansion with a bone-borne appliance in young and late adolescent patients*. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2021;159(4):e363-e375.)

Studi condotti mediante CBCT hanno evidenziato come gli espansori ad ancoraggio scheletrico siano in grado di agire non soltanto sulla sutura palatina mediana, ma anche sulle strutture posteriori di resistenza, in particolare sulla sutura pterigo-palatina. Tale caratteristica consente di ottenere un pattern di espansione scheletrica meno triangolare in senso antero-posteriore rispetto a quello osservato con gli espansori palatali tradizionali.

Gli espansori bone-borne permettono infatti una distribuzione più uniforme delle forze lungo l'intera estensione della sutura palatina mediana, determinando una modalità di apertura maggiormente parallela in direzione antero-posteriore. Inoltre, l'entità della separazione suturale risulta generalmente superiore rispetto a quella ottenuta con dispositivi ad ancoraggio esclusivamente dentale, consentendo di raggiungere risultati scheletrici più favorevoli anche nei pazienti post-adolescenziali [147].

In passato era ampiamente diffusa la convinzione che nei giovani adulti non fosse possibile ottenere la disgiunzione della sutura palatina mediana e della sutura pterigo-palatina mediante espansori rapidi palatali convenzionali. Tale limitazione veniva attribuita all'elevato grado di interdigitazione ossea presente a livello di queste strutture, ritenute pertanto suscettibili di separazione soltanto attraverso procedure chirurgiche [148].

Le più recenti evidenze scientifiche hanno tuttavia messo in discussione questa teoria. Diversi studi basati sull'impiego della CBCT hanno valutato gli effetti degli espansori bone-borne e tooth-bone borne sulle suture circum-mascellari, dimostrando come i dispositivi ad ancoraggio scheletrico siano in grado di produrre un'effettiva espansione trasversale anche in soggetti giovani adulti. Tali trattamenti determinano un incremento della dimensione trasversale del mascellare superiore e, in alcuni casi, consentono persino l'apertura della sutura pterigo-palatina, precedentemente considerata non modificabile mediante dispositivi ortopedici convenzionali [114,142].

Sono stati inoltre confrontati gli effetti prodotti dagli espansori ibridi (tooth-bone borne) e dagli espansori a supporto esclusivamente scheletrico (bone-borne), valutando parametri quali espansione dentale, espansione scheletrica, variazioni dell'altezza e dello spessore dell'osso alveolare vestibolare e modificazioni dell'inclinazione degli elementi dentari.

I risultati hanno evidenziato come entrambe le tipologie di dispositivi siano in grado di ottenere livelli di espansione dentale e scheletrica sostanzialmente sovrapponibili. Tuttavia, nei pazienti trattati con apparecchiature ibride è stata osservata una maggiore riduzione dell'altezza e dello spessore dell'osso alveolare vestibolare, associata a un incremento dell'inclinazione degli elementi dentari utilizzati come ancoraggio.

Tali modificazioni sembrano inoltre essere influenzate dalle condizioni anatomiche iniziali del paziente: soggetti che presentano già una ridotta quantità di osso alveolare tendono a manifestare una perdita ossea maggiore durante il trattamento. Al contrario, nei pazienti trattati con espansori bone-borne, le variazioni relative all'altezza e allo spessore dell'osso alveolare vestibolare, nonché le modificazioni dell'inclinazione dentaria, risultano generalmente non significative dal punto di vista statistico. Per questo motivo, gli espansori ad ancoraggio esclusivamente scheletrico vengono considerati particolarmente indicati nei pazienti adulti e nei

soggetti che presentano condizioni parodontali compromesse o una ridotta disponibilità di supporto osseo alveolare [149].

1.6.3.4. Protocolli di attivazione MARPE

In letteratura sono stati proposti diversi protocolli di attivazione per il dispositivo MARPE, con l'obiettivo di ottimizzare l'espansione scheletrica e ridurre gli effetti collaterali associati al trattamento.

Il protocollo descritto da Lee et al. [150] prevede un'attivazione pari a una rotazione completa al giorno, corrispondente a un quarto di giro della vite di espansione (0,2 mm per attivazione). Il monitoraggio del trattamento viene effettuato mediante radiografie periapicali degli incisivi centrali superiori, comprendenti anche il dispositivo di espansione, eseguite prima dell'inizio della terapia (T0), dopo 14 giorni di attivazione (T1) e al termine dell'espansione attiva (T2) nei soggetti in cui sia stata ottenuta la separazione della sutura palatina mediana.

Dopo i primi 14 giorni di attivazione, la radiografia periapicale acquisita a T1 viene confrontata con quella iniziale per verificare la presenza di segni di apertura della sutura palatina mediana. Qualora la separazione suturale non sia evidente, il protocollo prevede una fase di riposo della durata di quattro settimane, al termine della quale l'espansione viene ripresa.

Successivamente, dopo ulteriori 14 giorni di attivazione, viene eseguita una nuova valutazione radiografica. Se anche in questa fase non viene osservata la separazione della sutura, il trattamento espansivo viene interrotto. L'espansione attiva viene invece considerata conclusa quando la cuspidale palatale di uno dei denti superiori di ancoraggio entra in contatto con la cuspidale vestibolare del corrispondente elemento dentario mandibolare.

Alla fase attiva segue un periodo di contenzione della durata compresa tra tre e sei mesi, necessario per consentire la neoformazione ossea all'interno della sutura palatina mediana separata e per ridurre il rischio di recidiva scheletrica.

Nei pazienti adulti, l'applicazione di protocolli di espansione rapida assistita da miniviti, caratterizzati da due attivazioni giornaliere (0,4 mm al giorno), può determinare un sovraccarico biomeccanico del dispositivo o delle strutture anatomiche coinvolte, con conseguente riduzione dell'efficacia terapeutica.

Per limitare tali problematiche, Winsauer et al. [151] hanno proposto l'utilizzo di un espansore caratterizzato da una maggiore rigidità strutturale e un innovativo protocollo di espansione in due fasi, denominato MAPE (Miniscrew-Assisted Palatal Expansion), basato sul cosiddetto Force-Controlled Polycyclic Protocol (FCPC).

Questo protocollo combina una fase iniziale di attivazione con una successiva fase di espansione lenta polიცiclica a forza controllata, finalizzata all'indebolimento progressivo delle suture circum-palatali e al conseguente incremento dell'efficacia dell'espansione mascellare.

Nella prima fase, il dispositivo viene attivato per una settimana mediante due attivazioni giornaliere di un sesto di giro ciascuna, per un'espansione complessiva pari a circa 0,34 mm al giorno.

Nella seconda fase, il paziente viene istruito a eseguire due volte al giorno la seguente procedura:

- Ruotare il dado esagonale indietro di sei facce.
- Attendere 15 minuti.
- Riportare il dado nella posizione iniziale ruotandolo in avanti di sei facce.

Contestualmente, ogni tre giorni il dispositivo viene ulteriormente attivato di 0,17 mm, mantenendo la forza applicata al di sotto di 500 cN, fino al raggiungimento dell'espansione desiderata.

Questa fase di apertura e chiusura polიცiclica produce stimoli alternati di trazione e compressione che agiscono sulle suture circum-palatali, favorendo contemporaneamente processi di osteogenesi e osteoclastogenesi. Tale meccanismo sembra facilitare l'indebolimento delle strutture suturali e consentire un'espansione efficace anche nei pazienti di età più avanzata.

Inoltre, l'attivazione polიცiclica sembra determinare un indebolimento controllato della linea mediana del processo alveolare. Questo effetto potrebbe rappresentare un vantaggio clinico aggiuntivo, contribuendo a ridurre il rischio di danni dentali nei soggetti che presentano uno spazio particolarmente ridotto tra gli incisivi centrali superiori.

Anche Moon et al. [152] hanno sottolineato l'importanza di personalizzare il protocollo di attivazione in funzione dell'età e della maturazione scheletrica del paziente. Sulla base della propria esperienza clinica, gli Autori hanno proposto

differenti modalità di attivazione del MARPE, adattando velocità ed entità dell'espansione alle caratteristiche biologiche individuali del soggetto (Fig. 19).

<i>Age of the patient</i>	<i>Initial expansion rate</i>	<i>Expansion rate after opening of the diastema</i>
Early teens	3 turns/week	3 turns/week
Late teens	1 turn/day	1 turn/day
Adults	2 turns/day	1 turn/day
Older patients (>30 years)	>2 turns/day	1 turn/day

Figura 19 – Protocollo di attivazione proposto da Moon. (Brunetto DP, Sant'Anna EF, Machado AW, Moon W. *Non-surgical treatment of transverse deficiency in adults using Microimplant-assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE)*. *Dent Press J Orthod*. 2017)

1.6.4. Corticopunture e corticotomie

Sebbene la tecnica MARPE rappresenti una valida alternativa non chirurgica per il trattamento dell'atresia mascellare nei pazienti in fase finale della crescita e negli adulti, essa può presentare alcune limitazioni legate all'aumento dell'interdigitazione della sutura palatina mediana che si verifica dopo la pubertà. Con l'avanzare dell'età, infatti, le suture cranio-facciali tendono a diventare progressivamente più interdigitate e ossificate. Nei pazienti che presentano un elevato grado di maturazione suturale, affinché il trattamento MARPE produca una reale espansione scheletrica, la forza applicata deve essere sufficiente a superare le principali aree di resistenza anatomica del complesso cranio-facciale.

Tra queste strutture di resistenza si ricordano:

- I pilastri dell'apertura piriforme.
- I contrafforti zigomatici.
- Le giunzioni pterigoidee.
- La sutura palatina mediana, che rappresenta la prima struttura a dover essere separata durante il processo espansivo.

Per questo motivo, la riduzione delle resistenze ossee rappresenta un obiettivo clinico importante al fine di aumentare la prevedibilità e l'efficacia dell'espansione scheletrica nei pazienti con maturità scheletrica avanzata [27].

Negli ultimi anni sono state pertanto introdotte diverse tecniche ausiliarie volte a ridurre o eliminare tali resistenze e facilitare il trattamento espansivo.

Una di queste metodiche è la CP + MARPE (Corticopuncture-Facilitated Microimplant-Assisted Rapid Palatal Expansion), che prevede l'esecuzione di corticopunture lungo il decorso della sutura palatina mediana in associazione a un dispositivo MARPE ancorato mediante miniviti.

Alcuni Autori hanno inoltre proposto protocolli che combinano l'osteotomia mediana subspinale con l'esecuzione di corticopunture, con l'obiettivo di favorire ulteriormente la separazione delle strutture suturali resistenti.

Un'altra tecnica descritta in letteratura è la CAE (Corticotomy-Assisted Expansion), che prevede l'esecuzione di specifiche corticotomie a livello mascellare come supporto all'espansione dell'arcata superiore.

Tutte queste procedure condividono il medesimo obiettivo clinico: ridurre la resistenza biomeccanica delle strutture cranio-facciali e facilitare l'ottenimento di una maggiore espansione scheletrica nei pazienti adolescenti tardivi e negli adulti, limitando al contempo gli effetti dento-alveolari indesiderati.

1.6.4.1. Corticopuncture facilitated MARPE

La procedura di corticopuntura prevede l'esecuzione di microperforazioni lungo l'intero decorso della sutura palatina mediana con l'obiettivo di ridurre le resistenze ossee che si oppongono all'espansione scheletrica.

Le corticopunture possono essere realizzate sia a mano libera sia mediante l'utilizzo di dime chirurgiche ottenute tramite workflow digitale.

Nel caso della tecnica a mano libera, è fondamentale eseguire preventivamente un accurato studio dello spessore dei tessuti. Attraverso l'analisi della CBCT vengono misurati lo spessore dell'osso e quello della mucosa palatale; la somma di questi valori consente di determinare la profondità di perforazione desiderata. Una volta stabilita la misura corretta, viene posizionato uno stop sull'inserito chirurgico e si procede all'esecuzione delle corticopunture.

Le dime chirurgiche, invece, vengono progettate mediante la sovrapposizione di una scansione digitale delle arcate in formato STL con la CBCT preoperatoria del paziente. Uno dei sistemi più noti per la pianificazione dell'inserimento delle miniviti ortodontiche e delle corticopunture è il sistema REPLICA. Attraverso il software REPLICA, secondo il protocollo sviluppato dal Dott. Perinetti, viene

progettata la dima chirurgica che successivamente viene realizzata mediante stampa 3D.

Le corticopunture vengono generalmente eseguite mediante piezochirurgia, una metodica che consente di rendere l'intervento meno invasivo, migliorare il comfort del paziente e aumentare la precisione operativa.

Sia nella tecnica a mano libera sia in quella guidata da dima chirurgica, le corticopunture vengono realizzate utilizzando una fresa lanceolata, la stessa impiegata per l'esecuzione dei fori pilota destinati all'inserimento delle miniviti ortodontiche [27,153].

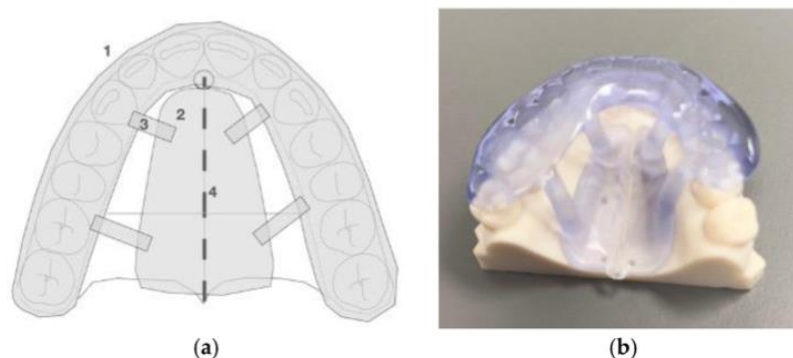


Figura 20 – Guida chirurgica personalizzata stampata in 3D per la pianificazione e l'esecuzione delle piezocorticotomie palatali assistite da MARPE. La guida è progettata mediante integrazione dei dati CBCT e dei file STL, consentendo il posizionamento preciso delle corticopunture in relazione all'anatomia individuale del paziente. (Koval S, Kolesnyk V, Chepanova D, et al. *Applications of the Novel Midpalatal Piezocorticotomy 3D-Printed Guide for MARPE-Assisted Midfacial Expansion*. *J Clin Med*. 2025;14(13):4728. doi:10.3390/jcm14134728.)

1.6.4.2. Corticotomy-assisted expansion

In letteratura è ampiamente documentato l'utilizzo della corticotomia come procedura ausiliaria per l'espansione dell'arcata mascellare superiore nel trattamento del deficit trasversale del mascellare. Tale approccio prende il nome di Corticotomy-Assisted Expansion (CAE) [28,154,155].

Luxi et al., in uno studio clinico condotto su 14 pazienti adulti [154], hanno dimostrato che l'espansione rapida del mascellare associata a procedure chirurgiche di corticotomia, definita Midpalatal Corticotomy-Assisted Rapid Maxillary Expansion (MCRME), rappresenta una metodica micro-invasiva efficace per ottenere un'espansione scheletrica nei giovani adulti affetti da deficit trasversale mascellare. Secondo gli Autori, tale procedura consente di ridurre le resistenze

anatomiche che si oppongono all'espansione, promuovere il fenomeno dell'accelerazione regionale (Regional Acceleratory Phenomenon, RAP) e favorire un movimento dentale più rapido.

Li et al., in uno studio condotto su 20 pazienti adulti [156], hanno osservato un significativo aumento della larghezza dell'osso palatale, della cavità nasale e della distanza intermolare dopo trattamento MCRME. È stato inoltre rilevato un incremento significativo del volume della cavità nasale e della nasofaringe, mentre non sono state osservate variazioni significative a carico dell'orofaringe e dell'ipofaringe.

Attraverso simulazioni di Dinamica dei Fluidi Computazionale (Computational Fluid Dynamics, CFD) applicate alle vie aeree superiori, gli Autori hanno inoltre evidenziato una significativa riduzione della caduta pressoria e della velocità massima del flusso aereo dopo il trattamento. Tali risultati suggeriscono che, nei pazienti adulti affetti da deficit trasversale del mascellare superiore, l'incremento della larghezza mascellare e del volume delle vie aeree superiori ottenuto mediante MCRME possa determinare un miglioramento sostanziale della ventilazione nasofaringea.

La corticotomia rappresenta pertanto una valida alternativa meno invasiva rispetto all'espansione mascellare chirurgicamente assistita. Tuttavia, non è esente da possibili effetti collaterali, tra cui dolore, edema e disagio postoperatorio.

Va infine sottolineato che, ad oggi, non esiste un consenso univoco in letteratura riguardo al protocollo chirurgico ideale per la corticotomia associata all'espansione ortopedica nei pazienti adulti.

Li et al. [156] descrivono l'esecuzione di un'osteotomia mediana lungo il decorso della sutura palatina mediana. Haas Junior et al. [155], invece, propongono un protocollo più esteso comprendente:

- Un'osteotomia subspinale per la separazione della spina nasale anteriore.
- Un'osteotomia verticale lungo la linea mediana, estesa fino al pavimento nasale a livello del terzo medio delle radici degli incisivi centrali.
- Due osteotomie laterali orizzontali, estese dall'apertura piriforme fino alla regione posteriore del mascellare.

Le differenze tra i vari protocolli riflettono la mancanza di una metodica universalmente accettata e confermano la necessità di ulteriori studi clinici

finalizzati a definire il ruolo e le modalità ottimali di impiego della corticotomia come supporto all'espansione mascellare nei pazienti adulti.

1.6.5. Espansione mascellare chirurgica

Nonostante l'espansione palatale rapida rappresenti il trattamento di elezione per la correzione del deficit trasversale del mascellare superiore nei pazienti in dentizione mista e durante l'adolescenza [157], la sua efficacia tende a ridursi progressivamente nei soggetti scheletricamente maturi.

Nei pazienti adulti, infatti, l'aumento dello spessore delle strutture ossee, la progressiva riduzione dell'elasticità suturale e il crescente grado di interdigitazione e obliterazione delle suture mascellari limitano significativamente gli effetti ortopedici dell'espansione palatale rapida convenzionale [38,40].

In queste condizioni, l'applicazione di un espansore tradizionale può determinare prevalentemente movimenti dento-alveolari piuttosto che una reale espansione scheletrica. Ciò comporta un aumento del rischio di effetti collaterali indesiderati, quali inclinazione vestibolare degli elementi dentali di ancoraggio, assottigliamento della corticale vestibolare, deiscenze ossee, fenestrazioni e compromissione del supporto parodontale [12].

Per questo motivo, nei pazienti post-puberali affetti da discrepanza trasversale del mascellare superiore non correggibile mediante il solo movimento dentale, le opzioni terapeutiche attualmente considerate più efficaci sono essenzialmente due:

- L'espansione rapida del mascellare assistita da ancoraggi scheletrici, mediante dispositivi ad appoggio su miniviti (MARPE, MSE o altri espansori scheletrici).
- L'espansione mascellare chirurgicamente assistita, indicata nei casi di elevata maturità scheletrica o quando le resistenze anatomiche risultano tali da non consentire una separazione suturale prevedibile mediante sole procedure ortopediche [16].

La scelta tra queste due opzioni dipende principalmente dall'età del paziente, dal grado di maturazione della sutura palatina mediana, dall'entità della discrepanza trasversale e dalla presenza di eventuali limitazioni anatomiche o parodontali.

1.6.5.1. Osteotomia segmentale e SARPE

Le procedure chirurgiche finalizzate all'espansione del mascellare superiore vengono tradizionalmente suddivise in due principali categorie: l'osteotomia segmentata di Le Fort I e l'espansione palatale rapida chirurgicamente assistita (Surgically Assisted Rapid Palatal Expansion, SARPE).

L'osteotomia segmentata di Le Fort I rappresenta una procedura definita *one-stage*, poiché l'espansione trasversale del mascellare viene ottenuta in un unico intervento chirurgico. Durante la procedura il mascellare viene segmentato e successivamente riposizionato chirurgicamente nella nuova posizione trasversale desiderata, consentendo l'immediata correzione della discrepanza trasversale.

La SARPE, invece, è considerata una procedura *two-stage*, poiché il trattamento si sviluppa in due fasi distinte. Nella prima fase viene effettuato il rilascio chirurgico delle principali aree di resistenza scheletrica, compresa la sutura palatina mediana interdigitata. Successivamente, in una seconda fase, si procede all'espansione graduale del mascellare mediante l'attivazione di un dispositivo di espansione rapida palatale, come ad esempio un Hyrax o un Transpalatal Distractor (TPD).

L'obiettivo della SARPE è quello di ridurre le resistenze scheletriche che limitano l'efficacia dell'espansione ortopedica nei pazienti scheletricamente maturi,

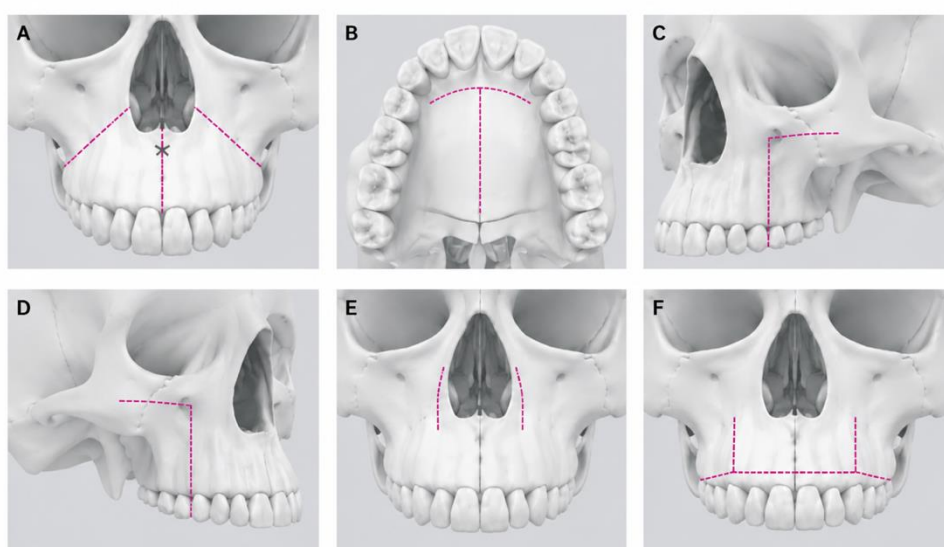


Figura 21 – Principali linee di osteotomia utilizzate nelle tecniche di espansione mascellare chirurgicamente assistita (SARPE).

(A) Osteotomia Le Fort I modificata con disgiunzione della sutura mediana; (B) Osteotomia palatale anteriore e mediana; (C-D) Osteotomie circoscritte a livello dei pilastri zigomatico-mascellari; (E) Osteotomie paranasali; (F) Osteotomia Le Fort I completa.

consentendo così l'ottenimento di una reale espansione trasversale del mascellare con minori effetti dento-alveolari indesiderati.

Una differenza fondamentale tra l'osteotomia segmentata di Le Fort I e la SARPE riguarda il pattern di espansione ottenuto. Con l'osteotomia segmentata del mascellare superiore, l'espansione tende generalmente a essere maggiore nella regione posteriore rispetto a quella anteriore. Al contrario, nei sistemi di espansione basati su una vite centrale, sia ortopedici sia chirurgicamente assistiti, l'espansione risulta prevalentemente maggiore nella porzione anteriore del mascellare. Questa differenza nella modalità di apertura può influenzare la stabilità del risultato nel lungo periodo e contribuire alle differenze osservate tra le due procedure [45].

Per quanto riguarda la stabilità a lungo termine, numerosi Autori ritengono che le procedure *two-stage*, come la SARPE, possano garantire risultati più stabili nel tempo [158]. La SARPE rappresenta pertanto una soluzione meno invasiva e particolarmente indicata nei casi di deficit trasversale isolato del mascellare superiore. Tuttavia, questa metodica non consente di correggere contemporaneamente malocclusioni complesse presenti nei tre piani dello spazio; di conseguenza, nei pazienti che presentano ulteriori discrepanze scheletriche, può rendersi necessario un successivo intervento di chirurgia ortognatica per completare il trattamento [45].

Nel corso degli anni sono state descritte numerose tecniche chirurgiche finalizzate a ridurre le resistenze dei pilastri zigomatico-mascellari e a favorire l'apertura della sutura palatina mediana. Attualmente non esiste un protocollo universalmente accettato per l'esecuzione della SARPE. Molti chirurghi considerano tuttavia l'osteotomia subtotale di Le Fort I associata all'osteotomia della sutura palatina mediana come la procedura più efficace in termini di stabilità a lungo termine [13]. L'osteotomia di Le Fort I viene generalmente eseguita mediante un'incisione vestibolare mascellare a tutto spessore. Per ridurre il gonfiore postoperatorio e limitare le alterazioni del complesso nasolabiale, è stato inoltre descritto in letteratura un approccio a tunnel.

La scuola di Torino propone un protocollo che prevede tre incisioni: una mediana e due posteriori localizzate in corrispondenza della regione premolare. Con l'ausilio di un divaricatore nasale di Aufrecht viene inizialmente eseguita una tradizionale osteotomia di Le Fort I. In tutti i casi, l'osteotomia subtotale comprende anche la disgiunzione pterigo-mascellare.

Successivamente viene esposta la regione sottostante la spina nasale anteriore per consentire l'esecuzione dell'osteotomia mediana. L'intera procedura viene effettuata mediante piezochirurgia.

L'osteotomia dalla parete para-lateronasale al contrafforte zigomatico-mascellare viene eseguita utilizzando una punta piezoelettrica dritta (Mectron MT8-20L). Con lo stesso inserto, l'osteotomia viene poi estesa posteriormente oltre il contrafforte zigomatico-mascellare.

Dopo l'identificazione del solco interincisivo sotto la spina nasale anteriore, viene eseguita l'osteotomia verticale mediante una punta piezoelettrica angolata (Mectron MT1-10). Le ridotte dimensioni di questi inserti consentono di realizzare osteotomie particolarmente precise, riducendo il rischio di danni alle radici dentarie.

Successivamente viene effettuata l'osteotomia del setto nasale. Considerando che le modificazioni statiche e dinamiche del volto dipendono in larga misura dal distacco o dalla sezione dei muscoli facciali dai loro siti di inserzione e che gli strumenti da taglio tradizionali possono determinare danni tissutali indesiderati, questo protocollo chirurgico risulta particolarmente vantaggioso. Le tre incisioni eseguite mediante approccio tunnel consentono infatti di limitare il trauma ai tessuti molli, mentre l'impiego della piezochirurgia riduce il rischio di danni iatrogeni e gli effetti collaterali associati agli strumenti rotanti convenzionali [159].

1.6.5.2. Dispositivi di espansione: Hyrax e Distrattore transpalatale

L'espansione mascellare nei pazienti sottoposti a SARPE può essere ottenuta mediante differenti tipologie di dispositivi espansivi.

L'apparecchiatura tradizionalmente più utilizzata per l'espansione trasversale della sutura palatina mediana è rappresentata dagli espansori rapidi palatali ad ancoraggio dentale (*tooth-borne*), come ad esempio il dispositivo Hyrax. Tra i principali vantaggi di questa tipologia di apparecchiatura sono stati riportati la semplicità di gestione clinica, l'assenza di irritazione della mucosa palatale e la facilità nel mantenimento dell'igiene orale. Tuttavia, sono stati descritti anche diversi effetti indesiderati, tra cui inclinazione vestibolare dei denti di ancoraggio, problematiche parodontali, riassorbimenti radicolari e fenestrazioni della corticale ossea.

Al fine di ridurre tali effetti collaterali, è stato proposto l'utilizzo di espansori ad ancoraggio scheletrico (*bone-borne*). Questi dispositivi consentono di trasferire direttamente le forze espansive alle strutture ossee del mascellare superiore, riducendo il coinvolgimento degli elementi dentali e favorendo un'espansione prevalentemente scheletrica.

Tra i principali dispositivi appartenenti a questa categoria si annovera il Distrattore Transpalatale (*Transpalatal Distractor*, TPD) [160] (Fig. 22). Tale apparecchiatura è progettata per applicare le forze espansive direttamente all'osso mascellare mediante ancoraggio scheletrico, consentendo una maggiore efficienza biomeccanica e una riduzione degli effetti dento-alveolari indesiderati rispetto agli espansori tradizionali ad ancoraggio dentale.

L'impiego di dispositivi *bone-borne* nell'ambito della SARPE riflette la crescente tendenza verso approcci terapeutici orientati alla massimizzazione degli effetti scheletrici e alla minimizzazione delle complicanze dentali e parodontali associate all'espansione mascellare nei pazienti scheletricamente maturi.

I protocolli di attivazione adottati dopo SARPE presentano notevoli variazioni tra i diversi Autori.

Cureton e Cuenin hanno proposto di modulare il ritmo di espansione in funzione della simmetria della frattura ossea ottenuta a livello del processo alveolare tra gli incisivi centrali superiori. Secondo questi Autori, il protocollo di attivazione dovrebbe essere personalizzato per ciascun paziente, tenendo conto sia della simmetria dell'apertura ossea sia delle condizioni dei tessuti parodontali e gengivali.

Un'attivazione eccessivamente rapida può infatti compromettere la corretta formazione ossea e determinare una mancata unione dei segmenti mascellari separati. Al contrario, un'attivazione troppo lenta può favorire una consolidazione precoce delle strutture ossee prima del raggiungimento dell'espansione desiderata. Dopo l'esecuzione della procedura chirurgica e l'attivazione iniziale dell'espansore, viene generalmente osservato un periodo di attesa prima dell'inizio dell'espansione attiva. Tale intervallo prende il nome di periodo di latenza.

Il periodo di latenza ha lo scopo di consentire l'avvio dei processi riparativi e la formazione di un iniziale callo osseo tra i segmenti separati, senza però permettere una completa consolidazione delle strutture osteotomizzate. In questo modo si crea

un ambiente biologico favorevole alla successiva distrazione e neoformazione ossea.

La maggior parte degli Autori concorda sull'importanza del periodo di latenza come fase fondamentale del trattamento; tuttavia, in letteratura sono riportate differenze riguardo alla sua durata ottimale, che può variare in funzione del protocollo chirurgico adottato e delle caratteristiche biologiche del paziente [13].

CAPITOLO 2 – MATERIALI E METODI

2.1. Disegno dello studio

Il presente studio è stato progettato come uno studio osservazionale su pazienti consecutivamente trattati in due differenti centri clinici. I casi sono stati gentilmente messi a disposizione dal Dottor Guglielmo Biondi, dal Dottor Paolo Biondi e dall'Ospedale Molinette di Torino dai Dottori Fabio Annarumma e Dottor Hussein Aghazada. I dati raccolti sono stati inseriti successivamente in una tabella, attraverso cui è stata condotta l'analisi statica. Lo scopo di questa tesi è confrontare gli effetti dell'espansione mascellare su pazienti con maturazione scheletrica avanzata, ottenuta con tre diverse tipologie di trattamento.

2.2. Popolazione

Il campione di questo studio ha incluso 21 pazienti in totale, di cui 12 femmine e 9 maschi di età compresa tra i 14 e i 36 anni (età media= 21,95 anni; SD= 5,85), aventi tutti un deficit trasversale a livello mascellare.

I pazienti sono stati divisi in tre gruppi in base al tipo di trattamento effettuato:

- **Gruppo 1: Solo MARPE** → sola espansione rapida del palato senza corticotomie e senza chirurgia.
- **Gruppo 2: SARPE**
- **Gruppo 3: MARPE + perforazioni corticali**

2.3. Gruppo 1: MARPE

Per il trattamento è stato utilizzato un dispositivo di espansione rapida del mascellare bone-borne, ancorato esclusivamente a quattro miniviti palatali. Le miniviti sono state inserite seguendo le indicazioni anatomiche descritte da Ludwig et al., che individuano nel palato anteriore paramediano il sito di inserzione di elezione grazie al maggiore spessore osseo disponibile. Dal punto di vista radiografico, gli Autori identificano come sede ottimale una regione localizzata 3–4 mm posteriormente al margine distale del forame incisivo e 3 mm lateralmente alla sutura palatina mediana, con inserzione della minivite perpendicolare alla superficie del palato. Dal punto di vista clinico, tali riferimenti corrispondono alla regione della terza ruga palatina. Nel presente studio, le due miniviti anteriori sono state quindi inserite in corrispondenza della terza ruga palatina, mentre le due miniviti posteriori sono state posizionate nella regione compresa tra il secondo premolare e il primo molare, come previsto dal protocollo clinico adottato.

Per guidare il corretto posizionamento delle miniviti sono state realizzate due dime chirurgiche personalizzate, ciascuna dotata di due fori guida. La prima consentiva l'inserimento della minivite destra nella regione compresa tra il secondo premolare e il primo molare e della sinistra a livello della terza ruga palatina; la seconda permetteva il posizionamento speculare, ossia della minivite destra in corrispondenza della terza ruga palatina e della sinistra tra il secondo premolare e il primo molare. La realizzazione di due dime si è resa necessaria poiché una singola guida chirurgica non avrebbe consentito l'inserimento di tutte e quattro le miniviti. Una volta completato il posizionamento delle miniviti, è stato applicato il dispositivo espansore, ancorato esclusivamente ad esse. L'attivazione è stata eseguita secondo il protocollo previsto dallo studio, con due attivazioni giornaliere, fino al raggiungimento dell'espansione desiderata. Per l'espansione è stata utilizzata una vite Leone, caratterizzata da un'espansione di 0,2 mm per ogni attivazione.

2.4. Gruppo 2: SARPE

I pazienti appartenenti al Gruppo 2 sono stati sottoposti a **Surgically Assisted Rapid Palatal Expansion** secondo la tecnica della **Scuola di Torino**.

La procedura chirurgica prevedeva l'esecuzione di tre incisioni verticali, una mediana e due posteriori in corrispondenza della regione dei premolari, necessarie per l'accesso chirurgico e per l'esecuzione di un'osteotomia di **Le Fort I** mediante tecnica tunnel. Tutta la procedura è stata eseguita mediante **piezochirurgia**, utilizzando inserti di ridotte dimensioni e di basso spessore, al fine di ottenere un'elevata precisione del taglio osseo e ridurre il rischio di danni alle strutture anatomiche adiacenti, in particolare alle radici dentarie.

Con l'ausilio di un retrattore nasale di Aufricht è stata inizialmente eseguita un'osteotomia di Le Fort I senza completarne la frattura. In tutti i pazienti è stata inoltre effettuata la disgiunzione pterigo-mascellare. Il taglio osseo è stato eseguito dalla parete paralateronasale fino al contrafforte zigomatico-mascellare mediante dispositivo piezoelettrico (Mectron) con inserto diritto MT8-20L, proseguendo posteriormente oltre il contrafforte zigomatico-mascellare.

Successivamente è stato esposto il solco localizzato inferiormente alla spina nasale anteriore per consentire l'esecuzione dell'osteotomia della linea mediana, effettuata mediante inserto piezoelettrico angolato MT1-10 (Mectron). L'osteotomia verticale interdentale della linea mediana e la mobilizzazione delle due emimaxille sono state infine completate indirettamente mediante l'utilizzo di una spatola.

Al termine della procedura chirurgica è stato applicato un espansore **bone-borne** ancorato a quattro miniviti. Il dispositivo, realizzato in titanio, era costituito da un corpo distrattore intercambiabile e regolabile e da due piastre fissate alle creste ossee palatali mediante viti corticali da 1,5 mm.

L'attivazione del dispositivo è stata avviata dopo un periodo di latenza di circa cinque giorni, con una velocità di espansione pari a **0,33 mm al giorno**, fino al raggiungimento dell'espansione pianificata. Una volta completata la fase attiva di espansione, il dispositivo è stato bloccato mediante l'apposita vite di bloccaggio e mantenuto in sede per sei mesi con funzione di ritenzione.

2.5 Gruppo 3: MARPE + Corticopunture

Nei pazienti appartenenti al terzo gruppo, prima del posizionamento del dispositivo di espansione **bone-borne**, sono state eseguite corticopunture a livello della sutura palatina mediana, secondo il protocollo descritto da **Moon**. Le corticopunture sono

indicate nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata, nei quali la progressiva interdigitazione della sutura palatina mediana determina un aumento della resistenza all'espansione ortopedica.

La procedura è stata eseguita mediante una dima chirurgica personalizzata, progettata con una serie di fori guida in corrispondenza della sutura palatina mediana, attraverso i quali sono state realizzate perforazioni della corticale mediante fresa chirurgica con un diametro di 1,3 mm a 150 giri/min. Lo scopo delle corticopunture è quello di ridurre la resistenza della sutura palatina mediana e delle corticali circostanti, inducendo una risposta biologica locale (Regional Acceleratory Phenomenon, RAP) che facilita la successiva disgiunzione della sutura durante l'espansione mascellare.

Al termine delle corticopunture è stato immediatamente inserito un dispositivo di espansione rapida del mascellare **bone-borne**, ancorato esclusivamente a quattro miniviti palatali. Le miniviti sono state inserite seguendo le indicazioni anatomiche descritte da Ludwig et al.,[134] che individuano nel palato anteriore paramediano il sito di inserzione di elezione. Dal punto di vista radiografico, tale sede corrisponde a una regione localizzata circa 3–4 mm posteriormente al margine distale del forame incisivo e 3 mm lateralmente alla sutura palatina mediana, mentre dal punto di vista clinico corrisponde alla terza ruga palatina. Nel presente studio, le due miniviti anteriori sono state inserite a livello della terza ruga palatina, mentre le due miniviti posteriori sono state posizionate nella regione compresa tra il secondo premolare e il primo molare.

Per guidare il corretto posizionamento delle miniviti sono state realizzate due dime chirurgiche personalizzate, ciascuna dotata di due fori guida. La personalizzazione delle dime chirurgiche è stata effettuata mediante l'accoppiamento di un file STL e della CBCT del paziente. La prima dima chirurgica consentiva l'inserimento della minivite destra nella regione compresa tra il secondo premolare e il primo molare e della sinistra a livello della terza ruga palatina; la seconda permetteva il posizionamento speculare. La realizzazione di due dime chirurgiche si è resa necessaria poiché la configurazione dei siti di inserzione non consentiva il corretto accesso a tutte e quattro le miniviti mediante un'unica guida chirurgica.

Successivamente è stato applicato il dispositivo espansore, ancorato esclusivamente alle quattro miniviti. L'attivazione è stata eseguita secondo il protocollo previsto dallo studio, con due attivazioni giornaliere, fino al raggiungimento dell'espansione

desiderata. Per l'espansione è stata utilizzata una vite Leone, prevedendo un'espansione di 0,2 mm per ogni attivazione.

2.5. Misurazioni

Per ciascun paziente sono state acquisite due CBCT: una prima scansione prima dell'inizio del trattamento di espansione mascellare (T0) e una seconda scansione al termine della fase di espansione (T1).

Le misurazioni e le analisi sono state effettuate mediante i software ITK-Snap e 3D Slicer.

In una prima fase, le TAC sono state orientate mediante il software 3D Slicer, in modo da consentire l'identificazione e il corretto posizionamento dei punti di repere anatomici. Successivamente mediante il software ITK-Snap, sono stati misurati specifici piani e angoli. In entrambe le fasi sono stati raccolti dati attraverso specifiche misurazioni, al fine di consentire un confronto accurato e preciso tra le diverse tipologie di espansione e di valutare eventuali asimmetrie.

2.5.1. Protocollo di misurazione con ITK-Snap

Le misurazioni effettuate con ITK-Snap sono state eseguite su tutte le CBCT T0 e T1 secondo il protocollo di Annarumma et al. [161] (Fig. 27 e Fig. 28). Preliminarmente, ciascuna CBCT è stata orientata mediante il software 3D Slicer sul piano bispinale, al fine di standardizzare le successive procedure di misurazione. Completata la fase di orientamento, l'analisi è stata condotta in ITK-Snap a partire dal piano coronale. La prima misurazione eseguita ha riguardato le ampiezze mascellari.

Scegliere la slice a livello della forcazione del 1° molare, tracciare:

1. Il segmento NF (Nasal floor): segmento che identifica l'ampiezza mascellare tangente al pavimento nasale al suo livello più basso.
2. Il segmento HP (Hard palate): segmento che identifica l'ampiezza mascellare tangente al palato duro al suo livello più alto.
3. Il segmento MP (Maxillary plane, dx e sn): segmento che connette il punto

più laterale dell'osso mascellare e il punto dove la corticale dell'osso che forma il pavimento delle cavità nasali incontra il seno mascellare.

Il secondo step prevede la misurazione degli angoli.

Scegli la slice a livello della forcazione del 1° molare, calcolare:

1. L'inclinazione del processo alveolare rispetto a NF (angolo mediale).
2. L'inclinazione del processo alveolare rispetto MPdx e MPsn (angolo esterno).
3. L'asse dentale (cuspide mesiale palatale e apice radice palatale) rispetto a MPdx e MPsn (angolo esterno).
4. L'asse dentale (cuspide mesiale palatale e apice radice palatale) rispetto a NF (angolo mediale).

Il terzo step prevede la misurazione dei diametri dentali.

Scegli la slice a livello della forcazione del 1° molare, tracciare:

1. Il segmento tra gli apici palatali dei due molari dx e sn.
2. Il segmento tra le CEJ dei due molari dx e sn.
3. Il segmento tra le cuspidi MP dei due molari dx e sn. Controllare l'ampiezza anche in visione assiale.

Il quarto step prevede le misurazioni verticali dentali.

Per le misurazioni verticali dentali tracciare:

1. La distanza tra la cuspide MV e il piano NF per il 1° molare dx e sn.
2. La distanza tra la cuspide MP e il piano NF per il 1° molare dx e sn.

Il quinto step prevede la misurazione dei diametri dentali.

Scegli la slice a livello del centro del 1° premolare, tracciare:

1. Il segmento tra gli apici palatali dei due premolari dx e sn.
2. Il segmento tra le CEJ dei due premolari dx e sn.
3. Il segmento tra le cuspidi palatali dei due premolari dx e sn.

Per il punto 8 è possibile controllare l'ampiezza anche in visione assiale.

Il sesto step prevede la misurazione della distanza bispinale, da effettuare in visione assiale solo a T1.

Scelta la livello della bispinale, procedere alla misurazione delle distanze bispinali:

1. Anteriore: nel punto più anteriore dove sono visibili le corticali.
2. Media: tra 5' e 6'.
3. Posteriore: nel punto più posteriore dove sono visibili le corticali.

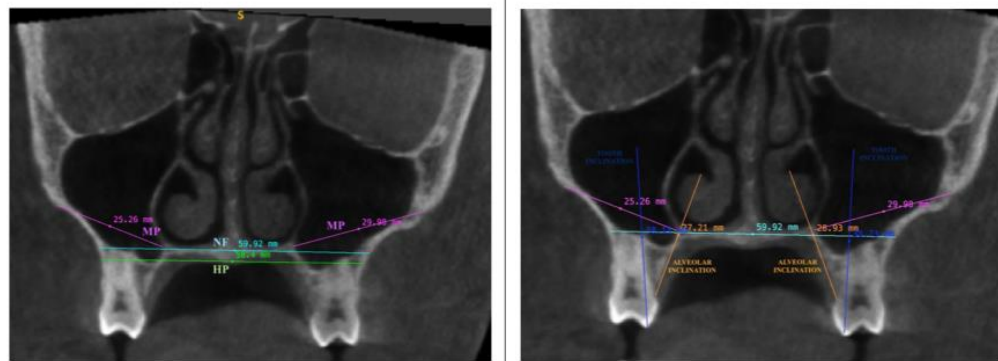


Figura 23 – misurazioni con il software ITK – snap

2.6 Analisi statistica

L'analisi statistica è stata eseguita confrontando le variabili ottenute nei tre gruppi di studio. La distribuzione dei dati è stata preliminarmente valutata mediante test di normalità di Shapiro–Wilk. Le variabili che presentavano una distribuzione normale in tutti i gruppi sono state analizzate mediante analisi della varianza a una via (One-way ANOVA), mentre per le variabili che non soddisfacevano il requisito di normalità è stato utilizzato il test non parametrico di Kruskal–Wallis.

I dati sono stati espressi come media $\pm$ deviazione standard (DS). Il livello di significatività statistica è stato fissato a $p < 0,05$.

CAPITOLO 3 - RISULTATI

Il campione iniziale comprendeva un totale di 21 pazienti, di cui 12 femmine e 9 maschi. L'età dei pazienti è compresa tra i 14 e 36 anni, con una media di 21,95 anni (SD: 5,85).

I gruppi di trattamento risultano così composti:

- **Gruppo 1:** 4 femmine e 2 maschi, età compresa tra 18 e 29 anni, trattato solo con MARPE.
- **Gruppo 2:** 5 femmine e 2 maschi, età compresa tra 17 e 36 anni, trattati chirurgicamente + espansore ancorato su miniviti.
- **Gruppo 3:** 3 femmine e 5 maschi, età compresa tra 14 e 30 anni, trattati con MARPE + corticopunture.

L'analisi statistica è stata condotta al fine di confrontare le modificazioni scheletriche e dento-alveolari ottenute nei tre gruppi di trattamento. I risultati sono riportati come media $\pm$ deviazione standard.

3.1. Modificazioni scheletriche

Le misurazioni relative alla larghezza del mascellare hanno evidenziato valori medi sostanzialmente comparabili nei tre gruppi.

A livello del **Nasal Floor (NF)**, i valori medi sono risultati pari a **64,72 $\pm$ 4,37 mm** nel Gruppo 1, **61,40 $\pm$ 4,95 mm** nel Gruppo 2 e **62,15 $\pm$ 3,17 mm** nel Gruppo 3, senza differenze statisticamente significative ($p = 0,085$). Analogamente, la larghezza misurata a livello dell'**Hard Palate (HP)** è risultata pari a **60,95 $\pm$ 3,78 mm**, **59,62 $\pm$ 3,22 mm**, e **57,90 $\pm$ 4,60 mm**, rispettivamente, anche in questo caso senza differenze significative ($p = 0,119$).

L'analisi della distanza bispinale ha confermato l'assenza di differenze significative nelle regioni anteriore e media. La distanza bispinale anteriore (ANT) è risultata pari a **4,01 $\pm$ 1,31 mm**, **3,49 $\pm$ 1,95 mm** e **4,16 $\pm$ 1,60 mm** nei tre gruppi ($p = 0,743$), mentre la distanza bispinale media (MED) ha mostrato valori pari a **4,45 $\pm$ 2,94 mm**, **2,68 $\pm$ 1,36 mm** e **3,52 $\pm$ 1,30 mm**, senza raggiungere la significatività statistica ($p = 0,290$).

Diversamente, la distanza bispinale posteriore (POST) ha evidenziato una differenza statisticamente significativa tra i gruppi ($p = 0,012$). Il Gruppo 1 ha presentato il valore medio più elevato ($3,46 \pm 1,47$ mm), seguito dal Gruppo 2 ($2,31 \pm 0,94$ mm), mentre il Gruppo 3 ha mostrato il valore medio inferiore ($1,53 \pm 0,37$ mm).

Nel complesso, le variabili scheletriche analizzate hanno mostrato un comportamento sostanzialmente omogeneo tra i tre protocolli terapeutici, con l'unica eccezione rappresentata dalla distanza bispinale posteriore.

3.2. Modificazioni dento-alveolari

L'analisi dei diametri dentali non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i gruppi per nessuna delle misurazioni effettuate. Per i molari, i diametri misurati a livello dell'apice, della giunzione amelo-cementizia (CEJ) e della cuspid e hanno mostrato valori confrontabili tra i tre gruppi ($p = 0,220$, $p = 0,958$ e $p = 0,322$, rispettivamente). Analogamente, le misurazioni dei premolari a livello apicale, della CEJ e della cuspid e non hanno evidenziato differenze statisticamente significative ($p = 0,483$, $p = 0,842$ e $p = 0,926$). L'analisi delle variabili angolari dento-alveolari ha mostrato una sostanziale omogeneità tra i gruppi per la maggior parte dei parametri considerati. Tuttavia, alcune misurazioni hanno evidenziato differenze statisticamente significative. Nel lato destro, la variabile DX cuspMP/NF ha presentato valori medi di $23,32 \pm 2,42^\circ$, $21,17 \pm 1,26^\circ$ e $24,95 \pm 3,81^\circ$ nei Gruppi 1, 2 e 3, rispettivamente ($p = 0,030$).

Nel lato sinistro sono risultate significative le misurazioni relative al Piano mascellare ($31,19 \pm 4,56^\circ$, $27,99 \pm 1,75^\circ$ e $32,18 \pm 4,95^\circ$; $p = 0,025$), al rapporto Processo alveolare/Piano mascellare ($80,07 \pm 8,48^\circ$, $77,85 \pm 7,42^\circ$ e $85,94 \pm 7,76^\circ$; $p = 0,042$), alla variabile cuspMV/NF ($22,55 \pm 2,30^\circ$, $20,52 \pm 2,04^\circ$ e $23,77 \pm 3,66^\circ$; $p = 0,039$) e alla variabile cuspMP/NF ($31,95 \pm 24,59^\circ$, $21,35 \pm 1,14^\circ$ e $24,75 \pm 3,31^\circ$; $p = 0,003$).

Considerando complessivamente le variabili dento-alveolari, i tre protocolli terapeutici hanno mostrato risultati ampiamente sovrapponibili. Le differenze statisticamente significative sono risultate limitate ad alcune misurazioni angolari,

senza evidenziare un pattern uniforme di superiorità di uno specifico protocollo rispetto agli altri.

Tabella 1 – Intergroup Comparison of Dental Variables

Confronto intergruppo delle variabili dento-alveolari misurate a livello del primo molare permanente destro e sinistro. Per ciascuna variabile sono riportati il test statistico impiegato, i valori medi $\pm$ deviazione standard dei tre gruppi di studio e il relativo livello di significatività statistica (p).

Variable	Test	Group 1	Group 2	Group 3	p-value
DX - Piano masc	Kruskal-Wallis	29.63 $\pm$ 8.33	28.23 $\pm$ 3.31	30.91 $\pm$ 4.18	0.336
DX - ProcAlv/NF	Kruskal-Wallis	90.50 $\pm$ 28.24	102.14 $\pm$ 5.87	100.94 $\pm$ 6.32	0.701
DX - ProcAlv/PM	One-way ANOVA	87.47 $\pm$ 12.04	81.75 $\pm$ 6.42	89.31 $\pm$ 8.99	0.176
DX - Asse/NF	One-way ANOVA	93.52 $\pm$ 8.72	99.15 $\pm$ 7.02	95.79 $\pm$ 6.08	0.154
DX - Asse/PM	Kruskal-Wallis	86.91 $\pm$ 6.43	84.16 $\pm$ 3.79	83.54 $\pm$ 28.29	0.313
DX - cuspMV/NF	Kruskal-Wallis	22.42 $\pm$ 2.69	20.72 $\pm$ 1.34	23.48 $\pm$ 3.80	0.141
DX - cuspMP/NF	Kruskal-Wallis	23.32 $\pm$ 2.42	21.17 $\pm$ 1.26	24.95 $\pm$ 3.81	0.030
SX - Piano masc	Kruskal-Wallis	31.19 $\pm$ 4.56	27.99 $\pm$ 1.75	32.18 $\pm$ 4.95	0.025
SX - ProcAlv/NF	Kruskal-Wallis	104.33 $\pm$ 11.97	104.75 $\pm$ 5.35	103.43 $\pm$ 4.49	0.801
SX - ProcAlv/PM	One-way ANOVA	80.07 $\pm$ 8.48	77.85 $\pm$ 7.42	85.94 $\pm$ 7.76	0.042
SX - Asse/NF	One-way ANOVA	97.62 $\pm$ 9.45	97.81 $\pm$ 3.40	94.79 $\pm$ 7.03	0.486
SX - Asse/PM	Kruskal-Wallis	85.38 $\pm$ 6.06	83.80 $\pm$ 5.95	91.85 $\pm$ 9.51	0.084
SX - cuspMV/NF	Kruskal-Wallis	22.55 $\pm$ 2.30	20.52 $\pm$ 2.04	23.77 $\pm$ 3.66	0.039
SX - cuspMP/NF	Kruskal-Wallis	31.95 $\pm$ 24.59	21.35 $\pm$ 1.14	24.75 $\pm$ 3.31	0.003

Come riportato nella Tabella 1, la maggior parte delle variabili dento-alveolari non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i tre gruppi ($p > 0,05$). Tuttavia, sono emerse differenze significative per le variabili DX cuspMP/NF ($p = 0,030$), SX Piano masc ($p = 0,025$), SX ProcAlv/PM ($p = 0,042$), SX cuspMV/NF ($p = 0,039$) e SX cuspMP/NF ($p = 0,003$)

Tabella 2 - Confronto intergruppo della distanza bispinale nelle regioni anteriore (ANT), media (MED) e posteriore (POST). Per ciascuna variabile sono riportati il test statistico utilizzato, i valori medi $\pm$ deviazione standard dei tre gruppi di studio e il relativo valore di significatività (p).

Shapiro-Wilk Normality Test

Variable	Group 1	Group 2	Group 3	Distribution
ANT	p=0.540	p=0.500	p=0.124	Normal
MED	p=0.217	p=0.873	p=0.426	Normal
POST	p=0.368	p=0.049	p=0.200	Non-normal (Group 2)

Intergroup Comparison

Variable	Test	p-value
ANT	One-way ANOVA	0.743
MED	One-way ANOVA	0.290
POST	Kruskal-Wallis	0.012

Descriptive Statistics (mean $\pm$ SD)

Variable	Group 1	Group 2	Group 3
ANT (mm)	4.01 $\pm$ 1.31	4.16 $\pm$ 1.60	3.49 $\pm$ 1.95
MED (mm)	4.45 $\pm$ 2.94	3.52 $\pm$ 1.30	2.68 $\pm$ 1.36
POST (mm)	3.46 $\pm$ 1.47	2.31 $\pm$ 0.94	1.53 $\pm$ 0.37

La Tabella 2 riporta il confronto delle misurazioni della distanza bispinale tra i tre gruppi di studio. Non sono emerse differenze statisticamente significative per le misurazioni anteriori (ANT; $p = 0,743$) e medie (MED; $p = 0,290$). Al contrario, la distanza bispinale posteriore (POST) ha evidenziato una differenza statisticamente significativa tra i gruppi ($p = 0,012$). In particolare, il Gruppo 1 ha presentato il valore medio più elevato ($3,46 \pm 1,47$ mm), seguito dal Gruppo 2 ($2,31 \pm 0,94$ mm), mentre il Gruppo 3 ha mostrato il valore medio inferiore ($1,53 \pm 0,37$ mm).

Tabella 3 - Confronto intergruppo dei diametri dentali misurati a livello dei molari e dei premolari. Per ciascuna misurazione sono riportati il test statistico utilizzato, i valori medi $\pm$ deviazione standard dei tre gruppi di studio e il relativo valore di significatività (p).

Intergroup Comparison

Measurement	Test	p-value
M_apex	One-way ANOVA	0.220
M_CEJ	One-way ANOVA	0.958
M_cusp	One-way ANOVA	0.322
P_apex	One-way ANOVA	0.483
P_CEJ	One-way ANOVA	0.842
P_cusp	One-way ANOVA	0.926

Descriptive Statistics (mean $\pm$ SD)

Measurement	Group 1	Group 2	Group 3
M_apex	34.17 $\pm$ 4.23	37.03 $\pm$ 3.42	34.80 $\pm$ 5.13
M_CEJ	33.51 $\pm$ 4.33	33.97 $\pm$ 3.68	33.49 $\pm$ 5.80
M_cusp	39.48 $\pm$ 5.36	38.69 $\pm$ 3.83	36.87 $\pm$ 4.69
P_apex	30.92 $\pm$ 4.06	32.48 $\pm$ 3.28	30.67 $\pm$ 4.64
P_CEJ	27.20 $\pm$ 3.80	28.08 $\pm$ 3.91	27.37 $\pm$ 4.52
P_cusp	30.28 $\pm$ 5.71	30.40 $\pm$ 4.36	30.99 $\pm$ 5.34

Le misurazioni dei diametri dentali hanno evidenziato valori sostanzialmente sovrapponibili nei tre gruppi di studio. Nessuna delle variabili analizzate ha raggiunto la significatività statistica ($p > 0,05$), suggerendo un comportamento omogeneo dei protocolli terapeutici relativamente all'espansione dentale valutata a livello dei molari e dei premolari.

Tabella 4 - Confronto intergruppo della larghezza mascellare misurata a livello del pavimento delle fosse nasali (Nasal Floor, NF) e del palato duro (Hard Palate, HP). Per ciascuna variabile sono riportati il test statistico utilizzato, i valori medi $\pm$ deviazione standard dei tre gruppi di studio e il relativo valore di significatività (p).

Shapiro-Wilk Normality Test

Variable	Group 1	Group 2	Group 3	Distribution
NF	$p = 0.192$	$p = 0.027$	$p = 0.490$	Non-normal (Group 2)
HP	$p = 0.529$	$p = 0.444$	$p = 0.397$	Normal

Intergroup Comparison

Variable	Test	p-value
NF	Kruskal-Wallis	0.085
HP	One-way ANOVA	0.119

Descriptive Statistics (mean $\pm$ SD)

Variable	Group 1	Group 2	Group 3
NF (mm)	64.72 ± 4.37	61.40 ± 4.95	62.15 ± 3.17
HP (mm)	60.95 ± 3.78	59.62 ± 3.22	57.90 ± 4.60

La Tabella 4 riporta il confronto intergruppo delle misurazioni della larghezza mascellare. I valori medi rilevati a livello del pavimento delle fosse nasali (NF) e del palato duro (HP) sono risultati sostanzialmente sovrapponibili nei tre gruppi di studio. L'analisi statistica non ha evidenziato differenze statisticamente significative per nessuna delle due variabili considerate (NF: $p = 0,085$; HP: $p = 0,119$), suggerendo un comportamento omogeneo dei protocolli terapeutici relativamente all'espansione trasversale del mascellare.

CAPITOLO 5 - DISCUSSIONE

5.1 Interpretazione generale dei risultati

Il trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata rappresenta tuttora una delle principali sfide dell'ortodonzia contemporanea. La progressiva interdigitazione della sutura

palatina mediana e l'aumento della resistenza offerta dalle suture circum-mascellari rendono infatti meno prevedibile l'espansione ortopedica convenzionale, favorendo lo sviluppo di protocolli terapeutici sempre più orientati a incrementare la componente scheletrica dell'espansione e a ridurre gli effetti indesiderati a carico degli elementi dentari.

In questo contesto si inserisce il presente studio, il cui obiettivo è stato quello di confrontare, mediante analisi tridimensionale su CBCT, gli effetti di differenti protocolli terapeutici impiegati nel trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore in pazienti con maturazione scheletrica avanzata. La possibilità di valutare contemporaneamente le modificazioni scheletriche e dento-alveolari ha consentito un'analisi più completa degli effetti prodotti dalle diverse metodiche di espansione.

Nel complesso, i risultati ottenuti mostrano come la maggior parte delle variabili analizzate non presenti differenze statisticamente significative tra i gruppi di trattamento. In particolare, le misurazioni relative alla larghezza mascellare e ai diametri dentali hanno evidenziato valori sostanzialmente comparabili, mentre solo alcune variabili dento-alveolari e la distanza bispinale posteriore hanno mostrato differenze statisticamente significative.

Questo dato suggerisce che, nonostante le differenze biologiche e biomeccaniche che caratterizzano i diversi protocolli terapeutici, essi siano in grado di raggiungere risultati clinici ampiamente sovrapponibili nella maggior parte dei parametri analizzati. Tale osservazione assume particolare interesse poiché conferma come il successo dell'espansione mascellare non dipenda esclusivamente dalla metodica impiegata, ma anche da una corretta selezione del paziente, da un'accurata pianificazione terapeutica e dal rispetto del protocollo clinico.

5.2 Modificazioni scheletriche

Le modificazioni scheletriche rappresentano l'obiettivo principale del trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore, soprattutto nei pazienti che hanno completato la crescita. In questa categoria di soggetti, infatti, l'espansione ideale dovrebbe determinare prevalentemente una separazione delle strutture scheletriche, limitando gli effetti dento-alveolari secondari.

Nel presente studio, le misurazioni effettuate a livello del **Nasal Floor** e dell'**Hard Palate** non hanno evidenziato differenze statisticamente significative tra i diversi protocolli terapeutici. Sebbene i valori medi abbiano mostrato lievi variazioni tra i gruppi, tali differenze non sono risultate sufficienti a dimostrare una diversa efficacia dei protocolli nel determinare un incremento della larghezza mascellare. Questi risultati appaiono coerenti con quanto riportato in letteratura. Diversi studi hanno dimostrato che gli espansori ad ancoraggio scheletrico consentono di ottenere una componente di espansione prevalentemente scheletrica grazie al trasferimento diretto delle forze all'osso palatino, riducendo il coinvolgimento degli elementi dentari [Lin et al.] [12]. Analogamente, la SARPE continua a rappresentare una metodica altamente efficace nei pazienti con elevata maturazione scheletrica, in quanto la riduzione chirurgica delle resistenze circum-mascellari permette di ottenere una disgiunzione prevedibile del mascellare [Suri e Taneja] [13].

Pertanto, l'assenza di differenze significative osservata nel presente studio potrebbe indicare che, quando ciascun protocollo viene correttamente indicato sulla base delle caratteristiche del paziente, sia possibile ottenere un'espansione scheletrica finale sostanzialmente comparabile, indipendentemente dalla metodica utilizzata.

5.3 Modificazioni della distanza bispinale e significato biologico

Tra tutte le variabili scheletriche analizzate, la distanza bispinale posteriore è risultata l'unica a mostrare una differenza statisticamente significativa tra i gruppi di trattamento. Al contrario, le misurazioni effettuate nelle regioni anteriore e media non hanno evidenziato differenze significative.

Questo risultato merita particolare attenzione poiché suggerisce che la risposta biologica all'espansione non sia uniforme lungo tutta l'estensione del mascellare. Infatti, mentre la porzione anteriore sembra rispondere in maniera simile indipendentemente dal protocollo terapeutico adottato, la regione posteriore potrebbe risentire maggiormente delle differenti modalità con cui ciascuna metodica supera le resistenze anatomiche.

Dal punto di vista anatomico, tale osservazione appare plausibile. La regione posteriore del mascellare è infatti strettamente correlata alle articolazioni pterigo-mascellari e alle suture circum-mascellari, considerate tra le principali strutture responsabili della resistenza all'espansione nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata. Diversi Autori, tra cui MacGinnis et al. e Chaconas et al. hanno evidenziato come proprio queste strutture rappresentino uno dei principali ostacoli all'apertura della sutura palatina mediana, influenzando la distribuzione delle forze generate dall'espansore e, di conseguenza, l'entità dell'espansione ottenuta nelle porzioni posteriori del mascellare [165, 178].

Alla luce di tali considerazioni, la differenza osservata nella distanza bispinale posteriore potrebbe riflettere una diversa capacità dei protocolli terapeutici di superare tali resistenze anatomiche. Tuttavia, poiché la maggior parte delle altre variabili scheletriche non ha mostrato differenze significative, tale risultato deve essere interpretato con cautela e non consente di affermare la superiorità di un protocollo rispetto agli altri.

Nel complesso, questi dati sembrano indicare che le differenti metodiche terapeutiche producano effetti scheletrici globalmente sovrapponibili, mentre eventuali differenze possano manifestarsi in specifiche regioni anatomiche caratterizzate da una maggiore complessità biomeccanica.

5.4 Modificazioni dento-alveolari

Uno degli obiettivi principali dell'espansione mascellare nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata consiste nel massimizzare la componente scheletrica dell'espansione limitando, per quanto possibile, gli effetti dento-alveolari secondari. Tra questi, l'inclinazione vestibolare degli elementi posteriori rappresenta uno degli effetti indesiderati maggiormente descritti in letteratura, in quanto può compromettere la stabilità del trattamento e determinare conseguenze a livello parodontale [Lin et al.] [12].

Nel presente studio, la maggior parte delle variabili dento-alveolari non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i gruppi. Anche i diametri dentali misurati a livello dei molari e dei premolari hanno mostrato valori sostanzialmente comparabili.

Tali risultati appaiono coerenti con il principio biomeccanico alla base degli espansori ad ancoraggio scheletrico. Diversamente dagli espansori convenzionali dento-supportati, nei quali le forze vengono trasmesse prevalentemente agli elementi dentari, la MARPE consente di distribuire il carico direttamente all'osso palatino attraverso le miniviti, riducendo così gli effetti indesiderati a carico dei denti posteriori. Questo meccanismo permette di ottenere un'espansione maggiormente scheletrica e di contenere il tipping dentale, coerentemente con i risultati riportati da Lin et al. e Cantarella et al. [12, 142].

Nel presente studio alcune variabili angolari hanno tuttavia mostrato differenze statisticamente significative tra i gruppi. Sebbene tali risultati possano suggerire una diversa risposta locale delle strutture dento-alveolari, le differenze osservate non seguono un andamento costante né interessano tutte le misurazioni considerate. Per questo motivo, è ragionevole ritenere che esse riflettano una variabilità biologica individuale piuttosto che un comportamento sistematicamente differente dei protocolli terapeutici.

Questa interpretazione risulta coerente con le evidenze riportate da Angelieri et al. e Brunetto et al., secondo cui la risposta all'espansione è influenzata non solo dal tipo di apparecchiatura utilizzata, ma anche dalle caratteristiche anatomiche e scheletriche individuali del paziente e dal grado di maturazione della sutura palatina mediana. [6, 152].

Di conseguenza, i risultati ottenuti sembrano confermare che il controllo degli effetti dento-alveolari dipenda dall'interazione di molteplici fattori biologici e biomeccanici, piuttosto che dalla sola scelta del protocollo terapeutico.

5.5 Significato clinico dei risultati

L'interpretazione dei risultati ottenuti nel presente studio suggerisce alcune considerazioni di interesse per la pratica clinica. Sebbene i protocolli terapeutici analizzati si basino su principi biomeccanici differenti e presentino un diverso grado di invasività, essi hanno determinato modificazioni tridimensionali ampiamente sovrapponibili nella maggior parte delle variabili considerate.

Questo dato suggerisce come la scelta del trattamento non debba essere orientata esclusivamente dalla ricerca della metodica più efficace in termini assoluti, ma

debba essere personalizzata sulla base delle caratteristiche del singolo paziente. Fattori quali l'età, il grado di maturazione della sutura palatina mediana, l'entità del deficit trasversale, la presenza di eventuali asimmetrie e le condizioni generali del paziente rappresentano elementi fondamentali nella pianificazione terapeutica.

Un aspetto di particolare rilevanza riguarda la necessità di non basare la scelta terapeutica esclusivamente sull'età anagrafica del paziente. Come evidenziato da Angelieri et al. [6], il grado di maturazione della sutura palatina mediana presenta un'elevata variabilità individuale e soggetti della stessa età possono mostrare livelli di interdigitazione profondamente differenti. Di conseguenza, la sola età cronologica non rappresenta un criterio sufficiente per orientare la scelta del trattamento. Una valutazione clinica e radiologica accurata, supportata dall'analisi della maturazione suturale mediante CBCT quando indicata, può pertanto contribuire alla selezione del protocollo terapeutico più appropriato per ciascun paziente.

In quest'ottica, la MARPE costituisce una valida alternativa all'espansione chirurgicamente assistita nei pazienti in cui sia prevedibile una risposta favorevole all'espansione scheletrica. Come descritto da Brunetto et al. [152], l'ancoraggio mediante miniviti consente di trasferire le forze direttamente al complesso scheletrico, favorendo la componente ortopedica dell'espansione e limitando gli effetti dento-alveolari tipicamente associati agli espansori convenzionali.

L'associazione della MARPE con le corticopunture potrebbe rappresentare un'opzione terapeutica interessante nei casi in cui si desideri ridurre la resistenza opposta dalla sutura palatina mediana e favorire l'espansione scheletrica, evitando, quando possibile, procedure chirurgiche più invasive. Sebbene nel presente studio tale approccio non abbia evidenziato una superiorità sistematica rispetto agli altri protocolli, esso ha comunque consentito di ottenere risultati comparabili nella maggior parte delle variabili analizzate.

La SARPE mantiene invece un ruolo fondamentale nei pazienti con elevata maturazione scheletrica o nei casi in cui la presenza di importanti resistenze anatomiche renda improbabile il successo di un trattamento esclusivamente ortopedico. Come riportato da Suri e Taneja, la riduzione chirurgica delle resistenze del complesso cranio-facciale consente di facilitare l'espansione trasversale del mascellare nei pazienti scheletricamente maturi, continuando pertanto a rappresentare un vantaggio nei casi clinici più complessi.

Alla luce di queste considerazioni, i risultati del presente studio sembrano confermare che non esista un protocollo terapeutico universalmente superiore agli altri. Piuttosto, l'efficacia del trattamento appare strettamente correlata alla corretta selezione del paziente e all'impiego della metodica più appropriata in relazione alle caratteristiche anatomiche, scheletriche e cliniche individuali.

5.6 Criticità dello studio

Nonostante i risultati ottenuti forniscano indicazioni interessanti sull'efficacia dei protocolli terapeutici analizzati, il presente studio presenta alcune limitazioni che devono essere considerate nell'interpretazione dei dati.

La prima riguarda la numerosità del campione. Sebbene il numero di pazienti inclusi abbia consentito il confronto tra i diversi gruppi di trattamento, un campione più ampio avrebbe garantito una maggiore solidità dei risultati e una valutazione più accurata delle differenze tra i protocolli analizzati.

Un'ulteriore limitazione è rappresentata dalla natura retrospettiva dello studio, che, pur consentendo l'analisi di casi clinici già trattati, limita il controllo di alcune variabili potenzialmente influenti, come la completa standardizzazione delle caratteristiche iniziali dei pazienti e delle condizioni cliniche al momento del trattamento.

Dal punto di vista metodologico, una criticità è stata rappresentata anche dall'analisi delle immagini CBCT. In alcuni casi, infatti, le scansioni risultavano parzialmente tagliate oppure non consentivano una chiara visualizzazione di tutti i reperi anatomici necessari alle misurazioni, rendendo più complessa l'identificazione dei punti di repere anatomici. Per ridurre l'impatto di tali criticità, tutte le immagini sono state accuratamente orientate mediante il software 3D Slicer e i reperi anatomici sono stati verificati prima dell'esecuzione delle misurazioni con ITK-SNAP.

È inoltre opportuno considerare la variabilità biologica individuale che caratterizza la maturazione della sutura palatina mediana. Come evidenziato da Angelieri et al. [6], soggetti della stessa età cronologica possono presentare differenti gradi di maturazione suturale e, di conseguenza, una diversa risposta all'espansione. Poiché

tale parametro non è stato considerato nella suddivisione dei gruppi, esso potrebbe aver influenzato, almeno in parte, la variabilità dei risultati osservati.

Un'ulteriore limitazione riguarda l'assenza di un follow-up a lungo termine. Le valutazioni effettuate descrivono gli effetti scheletrici e dento-alveolari osservati al termine della fase espansiva, ma non consentono di formulare considerazioni sulla stabilità dei risultati ottenuti nel tempo. Studi futuri condotti su campioni più ampi e con periodi di osservazione prolungati potrebbero consentire una valutazione più completa degli effetti e della stabilità dei diversi protocolli terapeutici.

5.7 punti di forza dello studio

Il presente studio presenta diversi punti di forza che conferiscono solidità metodologica ai risultati ottenuti.

In primo luogo, il confronto diretto tra tre differenti protocolli terapeutici (MARPE, SARPE e MARPE associata a corticopuntura) ha consentito di valutare comparativamente gli effetti scheletrici e dento-alveolari delle diverse metodiche nel trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore.

Un ulteriore punto di forza è rappresentato dall'impiego della tomografia computerizzata cone-beam (CBCT), eseguita sia prima dell'inizio del trattamento (T0) sia al termine della fase espansiva (T1). Tale approccio ha consentito di confrontare direttamente la situazione pre- e post-trattamento, permettendo una valutazione tridimensionale accurata delle modificazioni indotte dall'espansione mascellare.

Inoltre, tutte le immagini sono state preliminarmente orientate mediante il software 3D Slicer secondo un protocollo standardizzato, al fine di garantire la corretta identificazione dei reperi anatomici e l'uniformità delle valutazioni.

Le misurazioni sono state successivamente eseguite mediante il software ITK-SNAP, seguendo un protocollo di acquisizione e misurazione validato in letteratura e proposto da Annarumma et al.,[161] contribuendo a migliorare la riproducibilità delle misurazioni e a ridurre la variabilità operatore-dipendente.

Infine, la valutazione congiunta delle modificazioni della larghezza mascellare, della distanza bispinale e delle variabili dento-alveolari ha consentito un'analisi tridimensionale completa degli effetti prodotti dai diversi protocolli terapeutici,

fornendo un quadro complessivo delle modificazioni scheletriche e dentali conseguenti all'espansione.

5.8 Considerazioni conclusive

Alla luce dei risultati ottenuti e del confronto con la letteratura scientifica, il presente studio conferma come il trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata richieda un approccio terapeutico sempre più orientato alla personalizzazione.

Le differenti metodiche analizzate, pur basandosi su principi biomeccanici e biologici diversi, hanno mostrato risultati ampiamente sovrapponibili nella maggior parte delle variabili scheletriche e dento-alveolari considerate. Tale osservazione suggerisce come l'efficacia del trattamento non dipenda esclusivamente dalla tecnica impiegata, ma derivi dall'integrazione di molteplici fattori, tra cui la corretta selezione del paziente, il grado di maturazione della sutura palatina mediana, la pianificazione terapeutica e la corretta esecuzione del protocollo clinico.

I risultati ottenuti rafforzano inoltre il concetto, ormai ampiamente condiviso in letteratura, secondo cui l'età anagrafica non rappresenta, da sola, un criterio sufficiente per orientare la scelta terapeutica. La notevole variabilità biologica della maturazione suturale rende infatti indispensabile un'attenta valutazione individuale, supportata dall'esame clinico e, quando indicato, dall'analisi tridimensionale mediante CBCT. In quest'ottica, la scelta del trattamento dovrebbe essere guidata dalle caratteristiche anatomiche e biologiche del paziente piuttosto che dall'applicazione di protocolli standardizzati.

L'impiego della CBCT e dei software di elaborazione tridimensionale ha rappresentato un elemento fondamentale del presente lavoro, consentendo di analizzare con precisione le modificazioni indotte dai diversi protocolli terapeutici e di distinguere gli effetti scheletrici da quelli dento-alveolari. Questo approccio ha permesso di ottenere una valutazione più completa dell'espansione mascellare, contribuendo a una migliore comprensione delle risposte biologiche associate ai differenti trattamenti.

Nel complesso, il presente studio conferma la validità delle moderne metodiche di espansione del mascellare superiore e sottolinea l'importanza di un approccio

terapeutico individualizzato, basato sull'integrazione delle evidenze scientifiche con le caratteristiche cliniche del singolo paziente. Saranno tuttavia necessari ulteriori studi prospettici, condotti su campioni più numerosi e con follow-up a lungo termine, per approfondire la stabilità dei risultati ottenuti e definire con maggiore precisione le indicazioni cliniche dei diversi protocolli terapeutici.

CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto l'obiettivo di confrontare, mediante analisi tridimensionale su immagini CBCT, gli effetti di differenti protocolli terapeutici impiegati nel trattamento del deficit trasversale del mascellare superiore in pazienti con maturazione scheletrica avanzata.

I risultati ottenuti hanno evidenziato come la maggior parte delle variabili scheletriche e dento-alveolari analizzate non presenti differenze statisticamente significative tra i gruppi di trattamento. In particolare, le misurazioni relative alla larghezza mascellare e ai diametri dentali hanno mostrato valori sostanzialmente comparabili, mentre differenze significative sono state osservate solo per un numero limitato di parametri, tra cui la distanza bispinale posteriore e alcune variabili dento-alveolari.

Nel complesso, tali risultati suggeriscono che i protocolli terapeutici analizzati siano tutti in grado di ottenere un'espansione trasversale efficace quando correttamente indicati. Più che evidenziare la superiorità di una specifica metodica, il presente studio sottolinea l'importanza di una corretta selezione del paziente e di una pianificazione terapeutica personalizzata.

L'evoluzione delle tecniche di espansione mascellare ha infatti progressivamente orientato la pratica clinica verso approcci sempre meno invasivi, mantenendo risultati scheletrici prevedibili grazie a una migliore comprensione della biomeccanica dell'espansione e della risposta biologica dei tessuti. In questo contesto, la MARPE, associata o meno a procedure complementari quali corticopunture o osteotomie minimamente invasive, rappresenta una valida opzione terapeutica nei pazienti adeguatamente selezionati, mentre la SARPE continua a

mantenere un ruolo fondamentale nei casi caratterizzati da elevata maturazione scheletrica o da importanti resistenze anatomiche.

Un aspetto particolarmente rilevante emerso dal presente lavoro riguarda la conferma che l'età cronologica, da sola, non costituisce un criterio sufficiente per orientare la scelta terapeutica. La notevole variabilità individuale della maturazione della sutura palatina mediana rende infatti indispensabile una valutazione clinica e radiologica accurata, finalizzata all'identificazione del protocollo più appropriato per ciascun paziente.

L'impiego della CBCT, associato a un protocollo standardizzato di orientamento e misurazione tridimensionale mediante i software 3D Slicer e ITK-SNAP, ha consentito di ottenere una valutazione accurata delle modificazioni scheletriche e dento-alveolari, confermando l'utilità dell'imaging tridimensionale nello studio degli effetti dell'espansione mascellare.

Sebbene siano necessari ulteriori studi prospettici, condotti su campioni più numerosi e con follow-up a lungo termine, per approfondire la stabilità dei risultati e definire con maggiore precisione le indicazioni cliniche dei diversi protocolli, il presente studio contribuisce ad ampliare le conoscenze sugli effetti tridimensionali dell'espansione mascellare nei pazienti con maturazione scheletrica avanzata.

In conclusione, i risultati ottenuti confermano che la scelta del protocollo terapeutico non dovrebbe essere guidata dalla ricerca di una metodica universalmente superiore, ma dall'individuazione del trattamento più idoneo per il singolo paziente, attraverso un approccio personalizzato che integri le evidenze scientifiche, la valutazione della maturazione scheletrica e le caratteristiche anatomiche individuali.

Bibliografia

1. McNamara JA. Maxillary transverse deficiency. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2000;117(5):567-570. doi:10.1016/s0889-5406(00)70202-2
2. Andruccioli MCD, Matsumoto MAN. Transverse maxillary deficiency: treatment alternatives in face of early skeletal maturation. *Dent Press J Orthod*. 2020;25(1):70-79. doi:10.1590/2177-6709.25.1.070-079.bbo
3. Chamberland S. Maxillary expansion in nongrowing patients. Conventional, surgical, or miniscrew-assisted, an update. *J World Fed Orthod*. 2023;12(4):173-183. doi:10.1016/j.ejwf.2023.04.005
4. Baccetti T, Franchi L, De Toffol L, Ghiozzi B, Cozza P. The diagnostic performance of chronologic age in the assessment of skeletal maturity. *Prog Orthod*. 2006;7(2):176-188.
5. Mummolo S, Marchetti E, Albani F, et al. Comparison between rapid and slow palatal expansion: evaluation of selected periodontal indices. *Head Face Med*. 2014;10:30. doi:10.1186/1746-160X-10-30
6. Angelieri F, Cevitanes LHS, Franchi L, Gonçalves JR, Benavides E, McNamara JA. Midpalatal suture maturation: classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2013;144(5):759-769. doi:10.1016/j.ajodo.2013.04.022
7. Haas AJ. The treatment of maxillary deficiency by opening the midpalatal suture. *Angle Orthod*. 1965;35:200-217. doi:10.1043/0003-3219(1965)035<0200:TTOMDB>2.0.CO;2
8. Garib DG, Henriques JFC, Janson G, de Freitas MR, Fernandes AY. Periodontal effects of rapid maxillary expansion with tooth-tissue-borne and tooth-borne expanders: a computed tomography evaluation. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2006;129(6):749-758. doi:10.1016/j.ajodo.2006.02.021
9. Handelman CS, Wang L, BeGole EA, Haas AJ. Nonsurgical rapid maxillary expansion in adults: report on 47 cases using the Haas expander. *Angle Orthod*. 2000;70(2):129-144. doi:10.1043/0003-3219(2000)070<0129:NRMEIA>2.0.CO;2
10. Choi SH, Shi KK, Cha JY, Park YC, Lee KJ. Nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion results in acceptable stability in young adults. *Angle Orthod*. 2016;86(5):713-720. doi:10.2319/101415-689.1
11. Odenrick L, Karlander EL, Pierce A, Kretschmar U. Surface resorption following two forms of rapid maxillary expansion. *Eur J Orthod*.

1991;13(4):264-270. doi:10.1093/ejo/13.4.264

12. Lin L, Ahn HW, Kim SJ, Moon SC, Kim SH, Nelson G. Tooth-borne vs bone-borne rapid maxillary expanders in late adolescence. *Angle Orthod.* 2015;85(2):253-262. doi:10.2319/030514-156.1
13. Suri L, Taneja P. Surgically assisted rapid palatal expansion: a literature review. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2008;133(2):290-302. doi:10.1016/j.ajodo.2007.01.021
14. Byloff FK, Mossaz CF. Skeletal and dental changes following surgically assisted rapid palatal expansion. *Eur J Orthod.* 2004;26(4):403-409. doi:10.1093/ejo/26.4.403
15. Garib DG, Henriques JFC, Janson G, Freitas MR, Coelho RA. Rapid maxillary expansion--tooth tissue-borne versus tooth-borne expanders: a computed tomography evaluation of dentoskeletal effects. *Angle Orthod.* 2005;75(4):548-557. doi:10.1043/0003-3219(2005)75[548:RMETVT]2.0.CO;2
16. de Oliveira CB, Ayub P, Ledra IM, et al. Microimplant assisted rapid palatal expansion vs surgically assisted rapid palatal expansion for maxillary transverse discrepancy treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2021;159(6):733-742. doi:10.1016/j.ajodo.2020.03.024
17. Cho AR, Park JH, Moon W, Chae JM, Kang KH. Short-term effects of microimplant-assisted rapid palatal expansion on the circummaxillary sutures in skeletally mature patients: A cone-beam computed tomography study. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2022;161(2):e187-e197. doi:10.1016/j.ajodo.2021.01.023
18. Wilmes B. *Anwendungsgebiete von mini-implantaten.* In: Ludwig B, editor. *Mini-Implantate in der Kieferorthopädie. Innovative Verankerungskonzepte.* Quintessenz; 2007.
19. Wilmes B, Nienkemper M, Drescher D. Application and effectiveness of a mini-implant- and tooth-borne rapid palatal expansion device: the hybrid hyrax. *World J Orthod.* 2010;11(4):323-330.
20. Wilmes B, Nienkemper M, Drescher D. Application and effectiveness of a mini-implant- and tooth-borne rapid palatal expansion device: the hybrid hyrax. *World J Orthod.* 2010;11(4):323-330.
21. Garib DG, Navarro RDL, Francischone CE, Oltramari PVP. Rapid maxillary expansion using palatal implants. *J Clin Orthod JCO.* 2008;42(11):665-671.

22. Lee KJ, Park YC, Park JY, Hwang WS. Miniscrew-assisted nonsurgical palatal expansion before orthognathic surgery for a patient with severe mandibular prognathism. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2010;137(6):830-839. doi:10.1016/j.ajodo.2007.10.065
23. Moon W, Wu KW, MacGinnis M, et al. The efficacy of maxillary protraction protocols with the micro-implant-assisted rapid palatal expander (MARPE) and the novel N2 mini-implant-a finite element study. *Prog Orthod*. 2015;16:16. doi:10.1186/s40510-015-0083-z
24. Cunha AC da, Lee H, Nojima LI, Nojima M da CG, Lee KJ. Miniscrew-assisted rapid palatal expansion for managing arch perimeter in an adult patient. *Dent Press J Orthod*. 2017;22(3):97-108. doi:10.1590/2177-6709.22.3.097-108.oar
25. Park JJ, Park YC, Lee KJ, Cha JY, Tahk JH, Choi YJ. Skeletal and dentoalveolar changes after miniscrew-assisted rapid palatal expansion in young adults: A cone-beam computed tomography study. *Korean J Orthod*. 2017;47(2):77-86. doi:10.4041/kjod.2017.47.2.77
26. Park JJ, Park YC, Lee KJ, Cha JY, Tahk JH, Choi YJ. Skeletal and dentoalveolar changes after miniscrew-assisted rapid palatal expansion in young adults: A cone-beam computed tomography study. *Korean J Orthod*. 2017;47(2):77-86. doi:10.4041/kjod.2017.47.2.77
27. Bazargani F, Knode V, Plaksin A, Magnuson A, Ludwig B. Three-dimensional comparison of tooth-borne and tooth-bone-borne RME appliances: a randomized controlled trial with 5-year follow-up. *Eur J Orthod*. 2023;45(6):690-702. doi:10.1093/ejo/cjad024
28. Suzuki SS, Braga LFS, Fujii DN, Moon W, Suzuki H. Corticopuncture Facilitated Microimplant-Assisted Rapid Palatal Expansion. *Case Rep Dent*. 2018;2018:1392895. doi:10.1155/2018/1392895
29. Echchadi ME, Benchikh B, Bellamine M, Kim SH. Corticotomy-assisted rapid maxillary expansion: A novel approach with a 3-year follow-up. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2015;148(1):138-153. doi:10.1016/j.ajodo.2014.08.023
30. Hassan AH, Al-Fraidi AA, Al-Saeed SH. Corticotomy-assisted orthodontic treatment: review. *Open Dent J*. 2010;4:159-164. doi:10.2174/1874210601004010159
31. Fonzi L. *Anatomia funzionale e clinica dello splancnocranio*. Edi. Ermes; 2000.

32. Anastasi G, Capitani S, Carnazza ML, et al. *Anatomia umana. Trattato vol. 1-3*. QUARTA EDIZIONE. Edi. Ermes; 2010.
33. Chiapasco M. *Manuale illustrato di chirurgia orale*. 2° edizione. Elsevier; 2006.
34. Di Ieva A, Bruner E, Davidson J, et al. Cranial sutures: a multidisciplinary review. *Childs Nerv Syst ChNS Off J Int Soc Pediatr Neurosurg*. 2013;29(6):893-905. doi:10.1007/s00381-013-2061-4
35. Silvestrini Biavati A, Gastaldo L, Oniboni EM. Le suture craniche di interesse ortognatodontico. *Mondo Ortodontico*. Published online 1994.
36. Cozza P, Pachi F, Macchiarulo E. Il tessuto di sostegno delle arcate dentarie pt. I - Mascellare superiore e premaxilla. *Virtual Journal of Orthodontics*. Published online 2003.
37. Farronato PP E Pasciuti, G. Espansione rapida del palato: terapia del deficit trasversale scheletrico del mascellare superiore. *Dent Trib Italy*. Published online November 20, 2012.
38. Cohen MM. Sutural biology and the correlates of craniosynostosis. *Am J Med Genet*. 1993;47(5):581-616. doi:10.1002/ajmg.1320470507
39. Melsen B. Palatal growth studied on human autopsy material. A histologic microradiographic study. *Am J Orthod*. 1975;68(1):42-54. doi:10.1016/0002-9416(75)90158-x
40. Sun Z, Lee E, Herring SW. Cranial sutures and bones: growth and fusion in relation to masticatory strain. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*. 2004;276(2):150-161. doi:10.1002/ar.a.20002
41. Persson M, Thilander B. Palatal suture closure in man from 15 to 35 years of age. *Am J Orthod*. 1977;72(1):42-52. doi:10.1016/0002-9416(77)90123-3
42. Persson M, Magnusson BC, Thilander B. Sutural closure in rabbit and man: a morphological and histochemical study. *J Anat*. 1978;125(Pt 2):313-321.
43. Knaup B, Yildizhan F, Wehrbein H. Age-related changes in the midpalatal suture. A histomorphometric study. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopadie OrganOfficial J Dtsch Ges Kieferorthopadie*. 2004;65(6):467-474. doi:10.1007/s00056-004-0415-y
44. Korbmacher H, Schilling A, Püschel K, Amling M, Kahl-Nieke B. Age-dependent three-dimensional microcomputed tomography analysis of the human midpalatal suture. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopadie OrganOfficial J Dtsch Ges Kieferorthopadie*. 2007;68(5):364-376.

45. Wehrbein H, Yildizhan F. The mid-palatal suture in young adults. A radiological-histological investigation. *Eur J Orthod.* 2001;23(2):105-114. doi:10.1093/ejo/23.2.105
46. Proffit WR, Fields HW. *Contemporary Orthodontics*. 3rd edition. Mosby; 2000.
47. Grippaudo C, Paolantonio EG, Antonini G, Saulle R, La Torre G, Deli R. Association between oral habits, mouth breathing and malocclusion. *Acta Otorhinolaryngol Ital Organo Uff Della Soc Ital Otorinolaringol E Chir Cerv-facc.* 2016;36(5):386-394. doi:10.14639/0392-100X-770
48. Vázquez-Nava F, Quezada-Castillo JA, Oviedo-Treviño S, et al. Association between allergic rhinitis, bottle feeding, non-nutritive sucking habits, and malocclusion in the primary dentition. *Arch Dis Child.* 2006;91(10):836-840. doi:10.1136/ad.2005.088484
49. Chen X, Xia B, Ge L. Effects of breast-feeding duration, bottle-feeding duration and non-nutritive sucking habits on the occlusal characteristics of primary dentition. *BMC Pediatr.* 2015;15:46. doi:10.1186/s12887-015-0364-1
50. de Sousa RV, Ribeiro GLA, Firmino RT, Martins CC, Granville-Garcia AF, Paiva SM. Prevalence and associated factors for the development of anterior open bite and posterior crossbite in the primary dentition. *Braz Dent J.* 2014;25(4):336-342. doi:10.1590/0103-6440201300003
51. Corrêa-Faria P, Ramos-Jorge ML, Martins-Júnior PA, Vieira-Andrade RG, Marques LS. Malocclusion in preschool children: prevalence and determinant factors. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent.* 2014;15(2):89-96. doi:10.1007/s40368-013-0069-9
52. Bresolin D, Shapiro GG, Shapiro PA, et al. Facial characteristics of children who breathe through the mouth. *Pediatrics.* 1984;73(5):622-625.
53. Warren JJ, Bishara SE, Steinbock KL, Yonezu T, Nowak AJ. Effects of oral habits' duration on dental characteristics in the primary dentition. *J Am Dent Assoc 1939.* 2001;132(12):1685-1693; quiz 1726. doi:10.14219/jada.archive.2001.0121
54. Angle EH. *Treatment of Malocclusion of the Teeth and Fractures of the Maxillae: Angle's System*. Philadelphia : S. S. White Dental Mfg. Co.; 1900.
55. Ackerman JL, Proffit WR. The characteristics of malocclusion: a modern approach to classification and diagnosis. *Am J Orthod.* 1969;56(5):443-454. doi:10.1016/0002-9416(69)90206-1

56. da Silva Filho OG, Boas MC, Capellozza Filho L. Rapid maxillary expansion in the primary and mixed dentitions: a cephalometric evaluation. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 1991;100(2):171-179. doi:10.1016/s0889-5406(05)81524-0
57. Bin Dakhil N, Bin Salamah F. The Diagnosis Methods and Management Modalities of Maxillary Transverse Discrepancy. *Cureus*. 2021;13(12):e20482. doi:10.7759/cureus.20482
58. Caprioglio A. L'espansione del palato, come e quando attuarla. *Dentista Moderno*. Published online November 23, 2018.
59. Howe RP, McNamara JA, O'Connor KA. An examination of dental crowding and its relationship to tooth size and arch dimension. *Am J Orthod*. 1983;83(5):363-373. doi:10.1016/0002-9416(83)90320-2
60. Kim T, Ishikawa H, Chu S, Handa A, Iida J, Yoshida S. Constriction of the maxillary dental arch by mucoperiosteal denudation of the palate. *Cleft Palate-Craniofacial J Off Publ Am Cleft Palate-Craniofacial Assoc*. 2002;39(4):425-431. doi:10.1597/1545-1569_2002_039_0425_cotmda_2.0.co_2
61. Ishikawa H, Nakamura S, Misaki K, Kudoh M, Fukuda H, Yoshida S. Scar tissue distribution on palates and its relation to maxillary dental arch form. *Cleft Palate-Craniofacial J Off Publ Am Cleft Palate-Craniofacial Assoc*. 1998;35(4):313-319. doi:10.1597/1545-1569_1998_035_0313_stdopa_2.3.co_2
62. King L, Harris EF, Tolley EA. Heritability of cephalometric and occlusal variables as assessed from siblings with overt malocclusions. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 1993;104(2):121-131. doi:10.1016/S0889-5406(05)81001-7
63. Barbosa V, Maganzini AL, Nieberg LG. Dento-skeletal implications of Klippel-Feil syndrome [a case report]. *N Y State Dent J*. 2005;71(1):48-51.
64. Susami T, Kuroda T, Amagasa T. Orthodontic treatment of a cleft palate patient with surgically assisted rapid maxillary expansion. *Cleft Palate-Craniofacial J Off Publ Am Cleft Palate-Craniofacial Assoc*. 1996;33(5):445-449. doi:10.1597/1545-1569_1996_033_0445_otoacp_2.3.co_2
65. Gorlin RJ, Cohen MM, Hennekam RCM. *Syndromes of the Head and Neck*. 4th ed. Oxford University Press; 2001.
66. Dietz H. Marfan Syndrome. In: Adam MP, Feldman J, Mirzaa GM, et al., eds. *GeneReviews®*. University of Washington, Seattle; 2022.

67. Symons AL, Townsend GC, Hughes TE. Dental characteristics of patients with Duchenne muscular dystrophy. *ASDC J Dent Child*. 2002;69(3):277-283, 234.
68. Garrocho-Rangel A, Manríquez-Olmos L, Flores-Velázquez J, Rosales-Berber MÁ, Martínez-Rider R, Pozos-Guillén A. Non-syndromic craniosynostosis in children: Scoping review. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2018;23(4):e421-e428. doi:10.4317/medoral.22328
69. Guichet NF. Biologic laws governing functions of muscles that move the mandible. Part I. Occlusal programming. *J Prosthet Dent*. 1977;37(6):648-656. doi:10.1016/0022-3913(77)90215-3
70. Rakosi T, Jonas I, Graber TM. *Color Atlas of Dental Medicine - Orthodontic Diagnosis*. G. Thieme Verlag; 1993.
71. Redmond WR. Digital models: a new diagnostic tool. *J Clin Orthod JCO*. 2001;35(6):386-387.
72. Betts NJ, Vanarsdall RL, Barber HD, Higgins-Barber K, Fonseca RJ. Diagnosis and treatment of transverse maxillary deficiency. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg*. 1995;10(2):75-96.
73. Major PW, Johnson DE, Hesse KL, Glover KE. Effect of head orientation on posterior anterior cephalometric landmark identification. *Angle Orthod*. 1996;66(1):51-60. doi:10.1043/0003-3219(1996)066<0051:EOHOOP>2.3.CO;2
74. Timms DJ, Preston CB, Daly PF. A computed tomographic assessment of maxillary movement induced by rapid expansion - a pilot study. *Eur J Orthod*. 1982;4(2):123-127. doi:10.1093/ejo/4.2.123
75. Scarfe WC, Farman AG, Sukovic P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. *J Can Dent Assoc*. 2006;72(1):75-80.
76. Cohnen M, Kemper J, Möbes O, Pawelzik J, Mödder U. Radiation dose in dental radiology. *Eur Radiol*. 2002;12(3):634-637. doi:10.1007/s003300100928
77. Schulze D, Heiland M, Thurmann H, Adam G. Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dento Maxillo Facial Radiol*. 2004;33(2):83-86. doi:10.1259/dmfr/28403350
78. Mah JK, Danforth RA, Bumann A, Hatcher D. Radiation absorbed in maxillofacial imaging with a new dental computed tomography device.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2003;96(4):508-513. doi:10.1016/s1079-2104(03)00350-0

79. Dula K, Mini R, van der Stelt PF, Lambrecht JT, Schneeberger P, Buser D. Hypothetical mortality risk associated with spiral computed tomography of the maxilla and mandible. *Eur J Oral Sci.* 1996;104(5-6):503-510. doi:10.1111/j.1600-0722.1996.tb00133.x
80. Ngan DCS, Kharbanda OP, Geenty JP, Darendeliler MA. Comparison of radiation levels from computed tomography and conventional dental radiographs. *Aust Orthod J.* 2003;19(2):67-75.
81. Gowri Shankar S. *Textbook of Orthodontics*. 1st Revised Edition. Paras Medical Publisher; 2016.
82. Ackerman JL, Proffit WR. Preventive and interceptive orthodontics: a strong theory proves weak in practice. *Angle Orthod.* 1980;50(2):75-87. doi:10.1043/0003-3219(1980)050<0075:PAIOAS>2.0.CO;2
83. Fleming PS. Timing orthodontic treatment: early or late? *Aust Dent J.* 2017;62 Suppl 1:11-19. doi:10.1111/adj.12474
84. Perinetti G, Westphalen GH, Biasotto M, Salgarello S, Contardo L. The diagnostic performance of dental maturity for identification of the circumpubertal growth phases: a meta-analysis. *Prog Orthod.* 2013;14:8. doi:10.1186/2196-1042-14-8
85. Hägg U, Taranger J. Menarche and voice change as indicators of the pubertal growth spurt. *Acta Odontol Scand.* 1980;38(3):179-186. doi:10.3109/00016358009004718
86. Nanda RS, Ghosh J. Longitudinal growth changes in the sagittal relationship of maxilla and mandible. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 1995;107(1):79-90. doi:10.1016/s0889-5406(95)70159-1
87. Bondevik O. Growth changes in the cranial base and the face: a longitudinal cephalometric study of linear and angular changes in adult Norwegians. *Eur J Orthod.* 1995;17(6):525-532. doi:10.1093/ejo/17.6.525
88. Sharma P, Arora A, Valiathan A. Age Changes of Jaws and Soft Tissue Profile. *Sci World J.* 2014;2014:301501. doi:10.1155/2014/301501
89. Cunha AC, Cevidanes LH, Sant'Anna EF, et al. Staging hand-wrist and cervical vertebrae images: a comparison of reproducibility. *Dento Maxillo Facial Radiol.* 2018;47(5):20170301. doi:10.1259/dmfr.20170301

90. Perinetti G, Perillo L, Franchi L, Di Lenarda R, Contardo L. Maturation of the middle phalanx of the third finger and cervical vertebrae: a comparative and diagnostic agreement study. *Orthod Craniofac Res.* 2014;17(4):270-279. doi:10.1111/ocr.12052
91. Perinetti G, Franchi L, Contardo L. Determination of timing of functional and interceptive orthodontic treatment: A critical approach to growth indicators. *J World Fed Orthod.* 2017;6(3):93-97. doi:10.1016/j.ejwf.2017.08.006
92. Jaqueira LMF, Armond MC, Pereira LJ, Alcântara CEP de, Marques LS. Determining skeletal maturation stage using cervical vertebrae: evaluation of three diagnostic methods. *Braz Oral Res.* Published online 2010:433-437.
93. Soegiharto BM, Moles DR, Cunningham SJ. Discriminatory ability of the skeletal maturation index and the cervical vertebrae maturation index in detecting peak pubertal growth in Indonesian and white subjects with receiver operating characteristics analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2008;134(2):227- 237. doi:10.1016/j.ajodo.2006.09.062
94. Fernandes-Retto P, Matos D, Ferreira M, Bugaighis I, Delgado A. Cervical vertebral maturation and its relationship to circum-pubertal phases of the dentition in a cohort of Portuguese individuals. *J Clin Exp Dent.* 2019;11(7):e642-e649. doi:10.4317/jced.55907
95. Greulich WW, Pyle SI. *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist.* Stanford University Press; 1959.
96. Gianni E. *La nuova ortognatodonzia.* Piccin; 1986.
97. Björk A, Helm S. Prediction of the age of maximum puberal growth in body height. *Angle Orthod.* 1967;37(2):134-143. doi:10.1043/0003-3219(1967)037<0134:POTAOM>2.0.CO;2
98. Perinetti G. The Third Finger Middle Phalanx Maturation (MPM) Method to Assess Timing of Functional Treatment for Skeletal Class II Malocclusion: Report of Three Cases. *Case Rep Dent.* 2019;2019:8382612. doi:10.1155/2019/8382612
99. Perinetti G, Favaretto N, Villani B, Di Mauro E, Contardo L. Un semplice metodo di valutazione della maturazione scheletrica secondo la Scuola di Specializzazione di Trieste.
100. Baccetti T, Franchi L, McNamara JA. The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics. *Semin Orthod.* 2005;11(3):119-129.

doi:10.1053/j.sodo.2005.04.005

101. McNamara JA, Franchi L. The cervical vertebral maturation method: A user's guide. *Angle Orthod*. 2018;88(2):133-143. doi:10.2319/111517-787.1
102. Baccetti T, Franchi L, Cameron CG, McNamara JA. Treatment timing for rapid maxillary expansion. *Angle Orthod*. 2001;71(5):343-350. doi:10.1043/0003-3219(2001)071<0343:TTFRME>2.0.CO;2
103. Krukemeyer A. The effects of sutural and cervical vertebral maturation on dentoalveolar versus skeletal responses to rapid maxillary expansion. Published online 2013.
104. Hahn W, Fricke-Zech S, Fialka-Fricke J, et al. Imaging of the midpalatal suture in a porcine model: flat-panel volume computed tomography compared with multislice computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009;108(3):443-449. doi:10.1016/j.tripleo.2009.02.034
105. Pavithra S, Sri M, Revathi E, Aruna J. Rapid Maxillary Expansion and Appliance. *J Acad Dent Educ*. 2018;3:1. doi:10.18311/jade/2017/16446
106. Gianolio A, Cherchi C, Lanteri V. Rapid and slow maxillary expansion: a posteroanterior cephalometric study. *Eur J Paediatr Dent*. 2014;15(4):415-418.
107. Akkaya S, Lorenzon S, Uçem TT. Comparison of dental arch and arch perimeter changes between bonded rapid and slow maxillary expansion procedures. *Eur J Orthod*. 1998;20(3):255-261. doi:10.1093/ejo/20.3.255
108. Geran RG, McNamara JA, Baccetti T, Franchi L, Shapiro LM. A prospective long-term study on the effects of rapid maxillary expansion in the early mixed dentition. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2006;129(5):631-640. doi:10.1016/j.ajodo.2005.01.020
109. McNamara JA, Baccetti T, Franchi L, Herberger TA. Rapid maxillary expansion followed by fixed appliances: a long-term evaluation of changes in arch dimensions. *Angle Orthod*. 2003;73(4):344-353. doi:10.1043/0003-3219(2003)073<0344:RMEFBF>2.0.CO;2
110. Celenk-Koca T, Erdinc AE, Hazar S, Harris L, English JD, Akyalcin S. Evaluation of miniscrew-supported rapid maxillary expansion in adolescents: A prospective randomized clinical trial. *Angle Orthod*. 2018;88(6):702-709. doi:10.2319/011518-42.1

111. Akin M, Akgul YE, Ileri Z, Basciftci FA. Three-dimensional evaluation of hybrid expander appliances: A pilot study. *Angle Orthod.* 2016;86(1):81-86. doi:10.2319/121214-902.1
112. Blæhr TL, Mommaerts MY, Kjellerup AD, Starch-Jensen T. Surgically assisted rapid maxillary expansion with bone-borne versus tooth-borne distraction appliances-a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2019;48(4):492-501. doi:10.1016/j.ijom.2018.12.010
113. Krüsi M, Eliades T, Papageorgiou SN. Are there benefits from using bone-borne maxillary expansion instead of tooth-borne maxillary expansion? A systematic review with meta-analysis. *Prog Orthod.* 2019;20(1):9. doi:10.1186/s40510-019-0261-5
114. Kavand G, Lagravère M, Kula K, Stewart K, Ghoneima A. Retrospective CBCT analysis of airway volume changes after bone-borne vs tooth-borne rapid maxillary expansion. *Angle Orthod.* 2019;89(4):566.
115. Jones JP, Elnagar MH, Perez DE. Temporary Skeletal Anchorage Techniques. *Oral Maxillofac Surg Clin N Am.* 2020;32(1):27-37. doi:10.1016/j.coms.2019.08.003
116. Nguyen MV, Codrington J, Fletcher L, Dreyer CW, Sampson WJ. The influence of miniscrew insertion torque. *Eur J Orthod.* 2018;40(1):37-44. doi:10.1093/ejo/cjx026
117. Heymann GC, Tulloch JFC. Implantable devices as orthodontic anchorage: a review of current treatment modalities. *J Esthet Restor Dent Off Publ Am Acad Esthet Dent Al.* 2006;18(2):68-79; discussion 80. doi:10.2310/6130.2006.00013_1.x
118. Meyer U, Joos U, Mythili J, et al. Ultrastructural characterization of the implant/bone interface of immediately loaded dental implants. *Biomaterials.* 2004;25(10):1959-1967. doi:10.1016/j.biomaterials.2003.08.070
119. Leo M, Cerroni L, Pasquantonio G, Condò SG, Condò R. Temporary anchorage devices (TADs) in orthodontics: review of the factors that influence the clinical success rate of the mini-implants. *Clin Ter.* 2016;167(3):e70-77. doi:10.7417/CT.2016.1936
120. Mesa F, Muñoz R, Noguerol B, de Dios Luna J, Galindo P, O'Valle F. Multivariate study of factors influencing primary dental implant stability. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(2):196-200. doi:10.1111/j.1600-0501.2007.01450.x
121. Migliorati M, Benedicenti S, Signori A, et al. Miniscrew design and bone

characteristics: an experimental study of primary stability. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2012;142(2):228-234. doi:10.1016/j.ajodo.2012.03.029

122. Artzi Z, Tal H, Moses O, Kozlovsky A. Mucosal considerations for osseointegrated implants. *J Prosthet Dent*. 1993;70(5):427-432. doi:10.1016/0022-3913(93)90079-4
123. Wilmes B, Rademacher C, Olthoff G, Drescher D. Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants. *J Orofac Orthop*. 2006;67(3). doi:10.1007/s00056-006-0611-z
124. Tepedino M, Masedu F, Chimenti C. Comparative evaluation of insertion torque and mechanical stability for self-tapping and self-drilling orthodontic miniscrews - an in vitro study. *Head Face Med*. 2017;13(1):10. doi:10.1186/s13005-017-0143-3
125. Huja SS, Litsky AS, Beck FM, Johnson KA, Larsen PE. Pull-out strength of monocortical screws placed in the maxillae and mandibles of dogs. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2005;127(3):307-313. doi:10.1016/j.ajodo.2003.12.023
126. Zhang L, Zhao Z, Li Y, Wu J, Zheng L, Tang T. Osseointegration of orthodontic micro-screws after immediate and early loading. *Angle Orthod*. 2010;80(2):354-360. doi:10.2319/021909-106.
127. Cha JY, Kil JK, Yoon TM, Hwang CJ. Miniscrew stability evaluated with computerized tomography scanning. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2010;137(1):73-79. doi:10.1016/j.ajodo.2008.03.024

128. Barros SE, Janson G, Chiqueto K, Garib DG, Janson M. Effect of mini-implant diameter on fracture risk and self-drilling efficacy. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2011;140(4):e181-192. doi:10.1016/j.ajodo.2011.06.016
129. Migliorati M, Benedicenti S, Signori A, et al. Thread shape factor: evaluation of three different orthodontic miniscrews stability. *Eur J Orthod*. 2013;35(3):401-405. doi:10.1093/ejo/cjr145
130. Kyung S, Lim J, Park J. A study on the bone thickness of midpalatal suture area for miniscrew insertion. *Korean J Orthod*. 2004;34(1):63-70.
131. Gracco A, Lombardo L, Cozzani M, Siciliani G. Quantitative cone-beam computed tomography evaluation of palatal bone thickness for orthodontic miniscrew placement. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2008;134(3):361-369. doi:10.1016/j.ajodo.2007.01.027
132. Henriksen B, Bavitz B, Kelly B, Harn SD. Evaluation of bone thickness in the anterior hard palate relative to midsagittal orthodontic implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2003;18(4):578-581.
133. Hourfar J, Kanavakis G, Bister D, et al. Three dimensional anatomical exploration of the anterior hard palate at the level of the third ruga for the placement of mini-implants--a cone-beam CT study. *Eur J Orthod*. 2015;37(6):589-595. doi:10.1093/ejo/cju093
134. Ludwig B, Glasl B, Bowman SJ, Wilmes B, Kinzinger GSM, Lisson JA. Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites. *J Clin Orthod JCO*. 2011;45(8):433-441; quiz 467.
135. Ludwig B, Glasl B, Kinzinger GSM, Lietz T, Lisson JA. Anatomical guidelines for miniscrew insertion: vestibular interradicular sites. *J Clin Orthod JCO*. 2011;45(3):165-173.
136. Gedrange T, Bourauel C, Köbel C, Harzer W. Three-dimensional analysis of endosseous palatal implants and bones after vertical, horizontal, and diagonal force application. *Eur J Orthod*. 2003;25(2):109-115. doi:10.1093/ejo/25.2.109
137. Kim YJ, Lim SH, Gang SN. Comparison of cephalometric measurements and cone-beam computed tomography-based measurements of palatal bone thickness. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2014;145(2):165-172. doi:10.1016/j.ajodo.2013.10.009
138. Franchi L, Baccetti T, McNamara JA. Postpubertal assessment of treatment timing for maxillary expansion and protraction therapy followed by fixed appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2004;126(5):555-

568. doi:10.1016/j.ajodo.2003.10.036

139. Baik HS, Kang YG, Choi YJ. Miniscrew-assisted rapid palatal expansion: A review of recent reports. *J World Fed Orthod.* 2020;9(3S):S54-S58. doi:10.1016/j.ejwf.2020.08.004
140. Choi SH, Shi KK, Cha JY, Park YC, Lee KJ. Nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion results in acceptable stability in young adults. *Angle Orthod.* 2016;86(5):713-720. doi:10.2319/101415-689.1
141. Lim HM, Park YC, Lee KJ, Kim KH, Choi YJ. Stability of dental, alveolar, and skeletal changes after miniscrew-assisted rapid palatal expansion. *Korean J Orthod.* 2017;47(5):313-322. doi:10.4041/kjod.2017.47.5.313
142. Cantarella D, Dominguez-Mompell R, Mallya SM, et al. Changes in the midpalatal and pterygopalatine sutures induced by micro-implant-supported skeletal expander, analyzed with a novel 3D method based on CBCT imaging. *Prog Orthod.* 2017;18(1):34. doi:10.1186/s40510-017-0188-7
143. Cousley R. *The Orthodontic Mini-Implant Clinical Handbook*. Second Edition. Wiley Blackwell; 2020.
144. Lee KJ, Choi SH, Choi TH, Shi KK, Keum BT. Maxillary transverse expansion in adults: Rationale, appliance design, and treatment outcomes. *Semin Orthod.* 2018;24(1):52-65. doi:10.1053/j.sodo.2018.01.006
145. Seong EH, Choi SH, Kim HJ, Yu HS, Park YC, Lee KJ. Evaluation of the effects of miniscrew incorporation in palatal expanders for young adults using finite element analysis. *Korean J Orthod.* 2018;48(2):81-89. doi:10.4041/kjod.2018.48.2.81
146. Lee HK, Bayome M, Ahn CS, et al. Stress distribution and displacement by different bone-borne palatal expanders with micro-implants: a three-dimensional finite-element analysis. *Eur J Orthod.* 2014;36(5):531-540. doi:10.1093/ejo/cjs063
147. Annarumma DF, Aghazada DH, Pandolfi OS. L'espansione scheletrica mascellare in epoca post-puberale attraverso l'utilizzo di miniviti palatali. Published online 2018.
148. Pogrel MA, Kaban LB, Vargervik K, Baumrind S. Surgically assisted rapid maxillary expansion in adults. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg.* 1992;7(1):37-41.
149. Moon HW, Kim MJ, Ahn HW, et al. Molar inclination and surrounding alveolar bone change relative to the design of bone-borne maxillary expanders: A CBCT study. *Angle Orthod.* 2020;90(1):13-22. doi:10.2319/050619-316.1

150. Jeon JY, Choi SH, Chung CJ, Lee KJ. The success and effectiveness of miniscrew-assisted rapid palatal expansion are age- and sex-dependent. *Clin Oral Investig*. 2022;26(3):2993-3003. doi:10.1007/s00784-021-04281-0
151. Winsauer H, Walter A, Katsaros C, Ploder O. Success and complication rate of miniscrew assisted non-surgical palatal expansion in adults - a consecutive study using a novel force-controlled polycyclic activation protocol. *Head Face Med*. 2021;17(1):50. doi:10.1186/s13005-021-00301-2
152. Brunetto DP, Sant'Anna EF, Machado AW, Moon W. Non-surgical treatment of transverse deficiency in adults using Microimplant-assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE). *Dent Press J Orthod*. 2017;22(1):110-125. doi:10.1590/2177-6709.22.1.110-125.sar
153. Perinetti G, Bruno A, Tonini P. *Progetto REPLICA - Sistemi Di Pianificazione e Di Disegno Dispositivo, Manuale Di Pratica Clinica*. Seconda Edizione.; 2024.
154. Luxi W, Xiaojia S, Juan LI, Pengruofeng L, Jun L. Midpalatal cortex osteotomy assisted rapid maxillary expansion for correction of maxillary transverse deficiency in young adults. *Zhejiang Xue Xue Bao Yi Xue Ban J Zhejiang Univ Med Sci*. 2017;46(2):198-205. doi:10.3785/j.issn.1008-9292.2017.04.13
155. Haas Junior OL, Matje PRB, Rosa BM, et al. Minimally invasive surgical and miniscrew-assisted rapid palatal expansion (MISMARPE) in adult patients. *J Cranio-Maxillo-fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-fac Surg*. 2022;50(3):211-217. doi:10.1016/j.jcms.2021.12.011
156. LI J, SHI L, ZHANG X, WENG L, CHEN H, LIN J. Evaluating the effect of midpalatal corticotomy-assisted rapid maxillary expansion on the upper airway in young adults using computational fluid dynamics. *J Zhejiang Univ Sci B*. 2021;22(2):146-155. doi:10.1631/jzus.B2000090
157. Revelo B, Fishman LS. Maturational evaluation of ossification of the midpalatal suture. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 1994;105(3):288-292. doi:10.1016/S0889-5406(94)70123-7
158. Bays RA, Greco JM. Surgically assisted rapid palatal expansion: an outpatient technique with long-term stability. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg*. 1992;50(2):110-113; discussion 114-115. doi:10.1016/0278-2391(92)90352-z
159. Zavattero E, Gerbino G, Raveggi E, Borbon C, Ramieri G. Piezosurgery-assisted Minimally Invasive Surgical Rapid Palatal Expansion. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2021;9(12):e3994. doi:10.1097/GOX.0000000000003994
160. Kunz F, Linz C, Baunach G, Böhm H, Meyer-Marcotty P. Expansion patterns

in surgically assisted rapid maxillary expansion: Transpalatal distractor versus hyrax appliance. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopadie Organ Official J Dtsch Ges Kieferorthopadie*. 2016;77(5):357-365. doi:10.1007/s00056-016-0043-3

161. Annarumma F, Posadino M, De Mari A, et al. Skeletal and dental changes after maxillary expansion with a bone-borne appliance in young and late adolescent patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2021;159(4):e363-e375. doi:10.1016/j.ajodo.2020.11.031
162. Migliorati M, De Mari A, Annarumma F, et al. Three-dimensional analysis of miniscrew position changes during bone-borne expansion in young and late adolescent patients. *Prog Orthod*. 2023;24(1):20. doi:10.1186/s40510-023-00469-0
163. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018. Available online: <http://www.R-project.org/> (accessed on 12th of May 2024).
164. Carlson C, Sung J, McComb RW, Machado AW, Moon W. Microimplant-assisted rapid palatal expansion appliance to orthopedically correct transverse maxillary deficiency in an adult. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. 2016;149(5):716-728. doi:10.1016/j.ajodo.2015.04.043
165. MacGinnis M, Chu H, Youssef G, Wu KW, Machado AW, Moon W. The effects of micro-implant assisted rapid palatal expansion (MARPE) on the nasomaxillary complex--a finite element method (FEM) analysis. *Prog Orthod*. 2014;15(1):52. doi:10.1186/s40510-014-0052-y
166. Lee JS, Kim DH, Park YC, Kyung SH, Kim TK. The efficient use of midpalatal miniscrew implants. *Angle Orthod*. 2004;74(5):711-714. doi:10.1043/0003-3219(2004)074<0711:TEUOMM>2.0.CO;2
167. Melsen B, Melsen F. The postnatal development of the palatamaxillary region studied on human autopsy material. *Am J Orthod*. 1982;82(4):329-342. doi:10.1016/0002-9416(82)90467-5
168. Oliveira CB, Ayub P, Angelieri F, et al. Evaluation of factors related to the success of miniscrew-assisted rapid palatal expansion. *Angle Orthod*. 2021;91(2):187-194. doi:10.2319/051420-436.1

169. Magnusson A, Bjerklin K, Kim H, Nilsson P, Marcusson A. Three-dimensional assessment of transverse skeletal changes after surgically assisted rapid maxillary expansion and orthodontic treatment: a prospective computerized tomography study. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2012;142(6):825-833. doi:10.1016/j.ajodo.2012.08.015
170. Gauthier C, Voyer R, Paquette M, Rompré P, Papadakis A. Periodontal effects of surgically assisted rapid palatal expansion evaluated clinically and with cone-beam computerized tomography: 6-month preliminary results. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2011;139(4 Suppl):S117-128. doi:10.1016/j.ajodo.2010.06.022
171. Williams BJD, Currimbhoy S, Silva A, O’Ryan FS. Complications following surgically assisted rapid palatal expansion: a retrospective cohort study. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* 2012;70(10):2394-2402. doi:10.1016/j.joms.2011.09.050
172. de Freitas RR, Gonçalves AJ, Moniz NJ, Maciel FA. Surgically assisted maxillary expansion in adults: prospective study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2008;37(9):797-804. doi:10.1016/j.ijom.2008.04.019
173. Dergin G, Aktop S, Varol A, Ugurlu F, Garip H. Complications related to surgically assisted rapid palatal expansion. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2015;119(6):601-607. doi:10.1016/j.oooo.2015.01.008
174. Sygouros A, Motro M, Ugurlu F, Acar A. Surgically assisted rapid maxillary expansion: cone-beam computed tomography evaluation of different surgical techniques and their effects on the maxillary dentoskeletal complex. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2014;146(6):748-757. doi:10.1016/j.ajodo.2014.08.013
175. Bud ES, Bică CI, Păcurar M, et al. Observational Study Regarding Possible Side Effects of Miniscrew-Assisted Rapid Palatal Expander (MARPE) with or without the Use of Corticopuncture Therapy. *Biology.* 2021;10(3):187. doi:10.3390/biology10030187
176. Meirelles CM, Ferreira RM, Suzuki H, et al. Analysis of factors associated with the success of microimplant-assisted rapid palatal expansion. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2023;164(1):67-77. doi:10.1016/j.ajodo.2022.10.029
177. Hernandez-Alfaro F, Mareque Bueno J, Diaz A, Pagés CM. Minimally invasive surgically assisted rapid palatal expansion with limited approach under sedation: a report of 283 consecutive cases. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* 2010;68(9):2154-2158. doi:10.1016/j.joms.2009.09.080

178. Chaconas SJ, Caputo AA. Observation of orthopedic force distribution produced by maxillary orthodontic appliances. Am J Orthod. 1982;82(6):492–501. doi:10.1016/0002-9416(82)90331-7.

RINGRAZIAMENTI

Giunta al termine di questo lungo e significativo percorso, desidero esprimere la mia più sincera riconoscenza a tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state accanto e hanno contribuito a rendere possibile il raggiungimento di questo traguardo.

In primo luogo, ringrazio il Professor Migliorati che con la Sua professionalità, esperienza e conoscenza, ha permesso di avvicinarmi ancora di più alla materia che più mi ha affascinata in questi sei anni: l'ortodonzia.

Ringrazio immensamente La dottoressa De Mari, mia correlatrice. In questi mesi mi è stata accanto, mi ha supportata e mi ha insegnato tante cose. Non sarei mai riuscita a concludere questo lavoro senza il suo aiuto, costante supporto, ma soprattutto la sua immensa pazienza.

Ringrazio la Professoressa Menini, che ha avuto modo di incontrare le mie difficoltà e mi ha aiutata e compresa in ogni modo possibile.

Ringrazio la mia meravigliosa mamma che mi ha supportata sempre, in ogni mia vittoria e in ogni fallimento; sei sempre stata orgogliosa di me indipendentemente dal risultato. Grazie per avermi permesso di arrivare fin qui, facendo tanti sacrifici ma senza avermene mai fatto rendere conto. A te che non hai mai avuto nulla senza dover lottare con le unghie e denti, ma hai sempre fatto in modo che il mio percorso fosse semplice. A te che mi hai insegnato tutto, a te che mi hai fatta sentire amata ogni giorno della mia vita, a te che sei il mio sole.

Grazie ai miei nonni, non siete solo miei parenti, siete i miei migliori amici e coloro che hanno creduto in me più di quanto non facessi io stessa. Grazie per avermi sempre dato la grinta per andare avanti. Siete i nonni migliori che potessero mai capitarmi.

Grazie papà per avermi trasmesso la capacità di guardare sempre le cose da una prospettiva diversa dalla mia, e per aver spesso alleggerito il peso delle cose con la tua simpatia. Grazie Carola per il bene che mi hai trasmesso.

Grazie Jacopo e grazie alla Dott.ssa Luise, se sono qui oggi è anche grazie a voi.

Grazie a Tigrina, Ariel e Baloo, le anime più pure che abbiano mai abitato nel mio cuore.

Grazie Ilaria, la mia persona. Nei vocabolari ancora non esistono le parole necessarie per descrivere la meravigliosa persona che sei. Grazie per avermi spronata sempre, per aver creduto in me e per aver fatto in modo che non mi arrendessi mai, anche quando tutto era troppo pesante. Grazie perché ogni momento con te mi fa dimenticare il peso delle cose che spesso mi sovrasta. Grazie perché spesso è difficile farmi ridere ma tu non hai mai fallito nel riuscirci. Grazie per essere sempre la mia amica. Non ricordo alcun momento importante per me in cui tu non fossi presente. Grazie perché hai sempre trasformato anche il momento più semplice in qualcosa che porterò sempre nel mio cuore.

Grazie per avermi insegnato cosa fosse il vero Latin e Tedesc. Andiamo nel vicolo? “ho visto tutti i tuoi video”, solo 1 (manco quello). Ciao a tutti poldini e poldine.

Grazie Valentina, la mia brigadeira. Grazie per avermi sempre supportata, per essermi sempre stata accanto nel bene e nel male senza lasciarmi mai. Grazie perché se non fosse stato per te, sarei ancora al liceo cercando di capire matematica. A te che, nonostante spesso la vita sia stata crudele, non hai mai smesso di splendere e portare luce nella vita di chiunque. Sono grata

di averti al mio fianco, oggi e per sempre. Grazie per aver sempre assistito in prima fila ogni mia sfida e per avermi sempre aspettata al traguardo, senza mai dubitare che ci sarei arrivata. Ogni mia vittoria è tua. Sappi che sono orgogliosa di te e anche quando non mi vedi io sono sempre accanto a te. Sono fiera del fatto che, nonostante tutto ciò che hai passato non hai mai perso la purezza del tuo animo e credimi, non è scontato. Sei la mia vita, ora e sempre, e sono grata di poterti avere sempre al mio fianco. Grazie Fabio per esserti sempre preso cura e per aver scelto ogni giorno di amare la mia amica, esattamente nel modo in cui merita di essere amata.

Grazie Gaia e Sofia, per essere state sempre con me in questo lungo percorso. Grazie per tutte le volte in cui avete gioito per me, per tutte le volte che avete ascoltato le mie lamentele, per tutte le volte in cui ho pensato di non farcela. Sappiate che sono orgogliosa del nostro trio che è riuscito a superare gli impegni di tutte, una pandemia, città diverse e mesi in cui non riuscivamo a vederci. Se questo non è essere invincibili, non so allora cosa lo sia. Sono fiera di noi e sono fiera di ognuna di voi.

Grazie Lisa, a te che hai sempre sentito il bisogno di mostrarti inscalfibile, ma dentro tutta questa corazza c'è una persona dolce, sensibile, in grado di amare come poche persone sanno fare. Grazie per avermi fatto capire in questi anni quanto il bene tra due persone possa essere forte, in questo tempo direi che ne abbiamo passate tante eppure eccoci qui, nei ringraziamenti di una e dell'altra nei giorni più importanti della nostra vita. Sappi che sono lì a fare il tifo per te anche se non mi vedi.

Grazie Federico, perché anche se non sono stata la persona che meritavi, so che non hai mai smesso di volermi bene e di starmi vicino anche se siamo stati distanti per tanto tempo. Sei davvero una persona splendida e ti sono grata per tutto ciò che hai sempre fatto per me, non solo in questo ultimo periodo, ma da quando ci conosciamo (eccetto l'acqua che mi buttavi addosso). Sei e sarai sempre nel mio cuore, ti voglio tanto bene.

Grazie ai miei mentori: Dottor Biondi, Dottor Blanco e Dottor Cascone. Se questa mia passione è così forte, è grazie a voi.

Grazie a chi mi ha dedicato il suo tempo essendo qui con me oggi.

Grazie Sele, la mia cerbiattina. A te che sei stata la mia compagna di studi sin al primo anno, a te che mi hai insegnato che istologia si potesse preparare in 9 giorni, a te che mi hai insegnato che nella vita non bisogna mai arrendersi. Non ci sono parole per spiegare la purezza del tuo animo, sei una

perla rara; non cambiare mai e anche se la vita a volte sarà difficile non perdere mai la bontà che ti contraddistingue sempre.

Grazie Franci, mia amica speciale. Per quanto questi anni siano stati tanto difficili, tu hai reso ogni minuto sempre più bello e leggero. Grazie perché con la tua saggezza mi hai sempre fatto vedere le cose da un punto di vista diverso, grazie perché in ogni momento difficile tu mi sei sempre stata accanto e hai sempre fatto in modo che le cose mi fossero più semplici. Ti voglio bene, ora e sempre.

Grazie Federica, a te che sei la parte razionale di me stessa. Grazie perché con te ho scoperto quanto il mondo con persone come te sia un posto meraviglioso ed esistono ancora persone per la quale valga la pena vivere, e sai quanta importanza io dia a tutto questo. Non dimenticherò mai alcun momento passato insieme a te e sono certa che il legame forte che ci unisce non si spezzerà solo per due ore di distanza. In caso, comunque, ti incateno alla mia stanza.

Grazie Sari, l'anima che mi tiene accesa nei momenti in cui tutto è troppo complicato. Grazie perché, per quanto sia difficile, non hai mai assecondato le follie della mia testa ma mi hai sempre trascinato fuori dal fortice che a volte mi faceva perdere la ragione. A te che, anche se cerchi sempre di essere e dimostrarti forte, in realtà anche tu hai le tue fragilità: sappi che anche queste contribuiscono a renderti la meravigliosa persona che sei.

Grazie a Ioletta per ogni consiglio dato, per ogni pranzo e cena preparati con cura, per ogni lacrima asciugata e per ogni abbraccio dato. Grazie per aver fatto in modo che questi sei anni fossero splendidi e grazie per aver portato luce anche nei giorni più bui.

Grazie a PASTA per aver reso questi sei anni meravigliosi, pieni di risate e avventure. Rimarrete sempre nel mio cuore.

Grazie Alle, gelsomina, per tutti i momenti meravigliosi condivisi, per gli abbracci dati e per tutto ciò che ancora deve venire. Ti voglio tantissimo bene.

Al mio Chicco, la persona più buona che io conosca. Sei una persona tanto importante per me e il bene che ti voglio è immisurabile. Sappi che potrai sempre contare su di me e finché vorrai, io ci sarò. Importante è ricordare.... Che ti voglio tanto bene.

Grazie anche alla sofferenza che mi ha accompagnata in tutti questi anni, hai fatto in modo che costruissi la mia persona pezzetto dopo pezzetto. Grazie alla parte di me che ha saputo lottare e resistere: guarda dove sei riuscita a portarci oggi.

È da egocentrici ringraziare sé stessi? Può darsi, ma ricordiamoci che sono pur sempre AleNarci.