



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI MEDICINA E CHIRURGIA

**L'utilizzo della tecnologia laser nella
neurochirurgia mininvasiva: un'analisi
retrospettiva monocentrica**

**The use of laser technology in minimally
invasive neurosurgery: a monocentric
retrospective analysis**

Relatore: Chiar.mo Prof.

Maurizio Iacoangeli

Tesi di Laurea di:

Eleonora Delli Noci

Correlatore: Chiar.mo Prof.

Massimo Re

A.A. 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE

1 IL LASER

1.1 GENERALITÀ SULLA STRUTTURA E FUNZIONE

1.1.1 PANORAMICA SULLE VARIE TIPOLOGIE DI LASER E IL LORO IMPIEGO

1.1.1.1 LASER A DIOSSIDO DI CARBONIO CO₂

1.1.1.2 LASER NEODIMIO-YAG (NE:YAG)

1.1.1.3 LASER AD ARGON

1.1.1.4 LASER AL TULLIO E ALL'OLMIO

1.1.1.5 LASER AD ECCIMERI (UV)

1.1.1.6 LASER DOPPLER FLOWMETRY (LDF)

1.1.2 UTILIZZO DEL LASER A CO₂ IN NEUROCHIRURGIA

1.1.2.1 PANORAMICA DELLE COMPONENTI

1.1.2.2 VARIETÀ DI APPLICAZIONI IN NEUROCHIRURGIA

1.1.2.3 ISTRUZIONI PER L'USO

2 PROCESSO CHIRURGICO

2.1 GENERALITÀ SU PROCESSO OPERATIVO E INTEGRAZIONE TECNOLOGICA

2.2 I DETTAGLI DELLE VARIE FASI DEL PROCESSO CHIRURGICO

2.2.1 PIANIFICAZIONE PREOPERATORIA E CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA

2.2.2 CALIBRAZIONE E FOCALIZZAZIONE GUIDATA ("FOUR-DOT AID")

2.2.3 FASE DI INCISIONE: PIALTOMIA E CORTICOTOMIA DI PRECISIONE

2.2.4 ABLAZIONE VOLUMETRICA E DEBULKING ASSISTITO DA SCANNER

2.2.5 DISSEZIONE "NO-TOUCH" E GESTIONE DELLE STRUTTURE ELOQUENTI

2.2.6 EMOSTASI SUPERFICIALE E TOILETTE DELLA CAVITÀ

3 OGGETTO E SCOPO DELLO STUDIO

3.1 OGGETTO DI RICERCA

3.2 SCOPO DEL LAVORO

4 MATERIALI E METODI

4.1 MATERIALE CLINICO

4.2 MATERIALE NEURORADIOLOGICO

4.3 MATERIALE ISTOPATOLOGICO

4.4 MATERIALE CHIRURGICO

4.5 ANALISI STATISTICA

5 RISULTATI

5.1 RISULTATI CLINICI

5.2 RISULTATI NEURORADIOLOGICI

5.3 RISULTATI ISTOPATOLOGICI

5.4 RISULTATI CHIRURGICI

5.5 ANALISI STATISTICA

6 DISCUSSIONE

7 CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

L'introduzione della tecnologia laser (acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) in neurochirurgia rappresenta un traguardo fondamentale dell'applicazione della fisica quantistica alla medicina moderna. Le basi teoriche furono formulate da Albert Einstein nel 1917 con la teoria dell'emissione stimolata, ma la loro applicazione pratica in ambito chirurgico iniziò a concretizzarsi solo decenni dopo, con lo sviluppo del primo laser ad anidride carbonica da parte di Patel nel 1964 (1), quando Stellar e Samra eseguirono la prima resezione di un glioblastoma multiforme utilizzando proprio un laser a CO₂ (1). L'introduzione di sistemi di nuova generazione di sorgenti laser eccitate a radiofrequenza e micromanipolatori assistiti da scanner ha permesso una precisione micrometrica e una riproducibilità superiore, rendendo il laser uno strumento sicuro per il trattamento di lesioni cerebrali e spinali complesse, preservando le strutture neurovascolari eloquenti. L'evoluzione del laser in neurochirurgia ha trasformato questo strumento da semplice bisturi termico a sistema polivalente essenziale per la chirurgia minimamente invasiva e il monitoraggio neuroriabilitativo, promettendo ulteriori avanzamenti nella precisione chirurgica nella sicurezza intraoperatoria. L'ampio panorama delle applicazioni cliniche del laser in ambito neurochirurgico è intrinsecamente legato alla diversificazione tecnologica delle sorgenti e alla complessa interazione biofisica tra la lunghezza d'onda emessa e i cromofori specifici dei tessuti biologici (2)(3). La scelta della tipologia di laser non è dunque arbitraria, ma dettata dalla necessità di bilanciare precisione ablativa, capacità emostatica e profondità di penetrazione, al fine di salvaguardare l'integrità delle strutture neurovascolari eloquenti.

1. IL LASER

1.1 GENERALITÀ SULLA STRUTTURA E FUNZIONE

Il laser in chirurgia rappresenta una novità e un avanzamento tecnologico notevole. Esso è, in termini generali, un elemento operativo altamente specializzato e dalla particolare precisione funzionale, utilizzato in determinati contesti e casistiche. Nel corso degli anni, grazie al progredire delle conoscenze scientifiche e tecniche-ingegneristiche, è stato possibile lo sviluppo di una cospicua varietà di strumenti utilizzanti differenti tipologie di tecnologia laser. Esso può presentare una natura molto variegata e varie casistiche e modalità d'impiego a seconda di quest'ultima. Grazie alla sua straordinaria complessità strutturale ed esecutiva, questo strumento permette di superare dei limiti in campo operatorio, rendendo trattabili chirurgicamente e in taluni casi debellabili lesioni e patologie che in passato non potevano essere altrimenti trattate.

1.1.1 PANORAMICA SULLE VARIE TIPOLOGIE DI LASER E IL LORO IMPIEGO

Segue una panoramica sulle numerose tipologie di metodica laser sviluppatasi nel corso degli ultimi decenni e un accenno sull'impiego loro destinato.

1.1.1.1 LASER A DIOSSIDO DI CARBONIO (CO₂)

Il laser a diossido di carbonio, emesso in forma di radiazione infrarossa, operante alla lunghezza d'onda di 10.600 nm nello spettro dell'infrarosso, è uno dei laser più utilizzati in chirurgia. È considerato il gold standard per la chirurgia ablativa, agendo appunto con una lunghezza d'onda che permette di tagliare e vaporizzare i tessuti con grande precisione (2)(3). Viene adoperato per interventi in dermatologia (rimozione di tumori cutanei, cicatrici, verruche), in oftalmologia

(chirurgia degli occhi, come la correzione dei difetti visivi o il trattamento del glaucoma), in otorinolaringoiatria (rimozione di polipi nelle corde vocali) e in ginecologia (trattamento di lesioni cervicali e uterine).

1.1.1.2 LASER NEODIMIO-YAG (ND:YAG)

Il laser Nd:YAG (Neodymium-Doped-Yttrium-Aluminum-Garnet), con una lunghezza d'onda standard di 1.064 nm, offre proprietà fisiche radicalmente differenti. Caratterizzato da una minore affinità per l'acqua e una maggiore penetrazione tissutale, esso viene assorbito selettivamente dall'emoglobina, rendendolo uno strumento emostatico di eccellenza per il trattamento di lesioni ipervascolarizzate come le malformazioni arterovenose (AVM) o i meningiomi vascolari (3)(5). Grazie alla sua trasmissibilità attraverso fibre ottiche flessibili, il Nd:YAG è il pilastro della LITT (Laser Interstitial Thermal Therapy), una tecnica miniminvasiva guidata dalla risonanza magnetica che permette la termo-coagulazione stereotassica di tumori profondi o recidivanti, non suscettibili di chirurgia open (4)(5). Versioni a lunghezza d'onda maggiore (1,32 μm e 1,44 μm) sono state sviluppate per cercare di coniugare la flessibilità della fibra con un effetto tissutale più simile a quello del CO₂ (3)(5).

1.1.1.3 LASER AD ARGON

Il laser ad argon (488-514nm) e il laser KTP (532nm), operanti nello spettro del visibile (luce blu-verde), sono apprezzati per la loro capacità di attraversare i mezzi trasparenti e per l'eccellente assorbimento da parte dei pigmenti, trovando impiego nella fotocoagulazione di piccoli vasi e procedure endoscopiche ventricolari (5)(6).

1.1.1.4 LASER AL TULLIO E ALL'OLMIO

I laser al Tullio (2 μ m) e all'Olmio (Ho:YAG, 2,1 μ m) sfruttano picchi di assorbimento dell'acqua nel medio-infrarosso per la resezione di tumori fibrocalcifici e per la discectomia percutanea del nucleo polposi (2)(5). Il primo, specialmente nelle sue forme più moderne, è noto per la sua precisione e l'eccellente potere emostatico, permette un taglio continuo o pulsato garantendo una coagulazione simultanea dei vasi sanguigni e una grande precisione nell'incisione; utilizzato per l'enucleazione anatomica endoscopica. Il secondo è considerato una tecnica Gold standard per l'enucleazione prostatica, utilizza l'energia luminosa che penetra in superficie, ideale per tagliare il tessuto con un trauma minimo; è altamente efficace anche per la frammentazione dei calcoli vescicali e renali.

1.1.1.5 LASER AD ECCIMERI (UV)

I laser ad Eccimeri (UV) Rappresentano la frontiera dell'ablazione “a freddo”, agendo tramite un meccanismo fotochimico che rompe i legami molecolari con precisione sub-micrometrica, minimizzando gli effetti termici (5). È una tecnologia medica fondamentale nella chirurgia refrattiva per correggere miopia, astigmatismo e ipermetropia. Produce luce ultravioletta che “evapora” con estrema precisione lo stroma corneale per rimodellare la curvatura corneale, eliminando difetti visivi in modo stabile e senza danneggiare i tessuti circostanti con calore eccessivo.

1.1.1.6 LASER DOPPLER FLOWMETRY (LDF)

Trascendendo la funzione puramente chirurgica, il laser diviene uno strumento diagnostico essenziale tramite la Laser Doppler Flowmetry (LDF). Utilizzando solitamente una sorgente a 780 nm, questa tecnologia permette il monitoraggio in

tempo reale della microcircolazione cerebrale (7). Attraverso l'analisi simultanea del segnale di perfusione e dell'intensità della luce riflessa (TLI), la LDF guida il chirurgo nell'identificazione dei confini tra sostanza bianca e grigia e nella rilevazione di aree ad alto rischio emorragico durante biopsie o impianti di elettrodi per la Deep Brain Stimulation (DBS), elevando drasticamente gli standard di sicurezza intraoperatoria (7).

1.1.2 UTILIZZO DEL LASER A CO₂ IN NEUROCHIRURGIA

La struttura di un sistema laser a CO₂ per l'uso neurochirurgico combina i principi fondamentali della fisica ottica con le tecnologie avanzate di manipolazione robotica per garantire una precisione micrometrica. Grazie alla sua elevatissima affinità per l'acqua (componente primaria dei tessuti biologici molli), l'energia viene convertita istantaneamente in calore diretto verso un volume tissutale ridotto, consentendo una vaporizzazione precisa con una profondità di penetrazione minima e un danno termico collaterale ai tessuti sani adiacenti spesso inferiore a 0,5mm (2)(5). In neurochirurgia è ampiamente utilizzato per la resezione di tumori cerebrali e spinali (come gliomi e meningiomi) e per procedure intradurali, garantendo una tecnica “no-touch” che minimizza la manipolazione meccanica (6)(8). Questa, infatti, consente al chirurgo di incidere, asportare e vaporizzare le lesioni senza alcuna manipolazione o trazione delle strutture nervose circostanti, minimizzando così il trauma chirurgico e l'edema post-operatorio (2)(5). Il laser CO₂ agisce inoltre come un efficace strumento emostatico, sigillando vasi sanguigni di piccolo calibro (fino a 0,5-2mm di diametro) simultaneamente all'azione di taglio, favorendo una resezione quasi esangue anche nelle aree critiche o altamente vascolarizzate (6). La capacità di vaporizzare materiali cellulari

neoplastici lo rende particolarmente utile nel trattamento di tumori calcifici o fibrosi (come papillomi del plesso coroideo o i meningiomi della base cranica) che risultano spesso resistenti alle tecniche di debulking convenzionali come l'aspirazione ultrasonica (3). L'evoluzione tecnologica ha superato i limiti storici di manovrabilità grazie all'introduzione di sistemi assistiti di scanner robotizzati e micromanipolatori ad alta precisione (come lo SmartXide2), in grado di produrre spot micrometrici di soli 190 μm (2). Questi sistemi permettono di controllare con estrema accuratezza la profondità dell'ablazione e di operare attraverso corridoi chirurgici stretti, garantendo una riproducibilità dei risultati superiori rispetto alle tecniche a mano libera. Inoltre, lo sviluppo di fibre ottiche flessibili (Photonic Bandgap Fibers - PBF) ha esteso l'applicabilità del laser CO₂ anche a lesioni profonde o non raggiungibili in linea retta, trasformandolo in uno strumento polivalente essenziale per la neurochirurgia oncologica e funzionale moderna.

1.1.2.1 PANORAMICA DELLE COMPONENTI

1.1.2.1.1 ELEMENTI COSTITUTIVI FONDAMENTALI DELLA SORGENTE LASER

La struttura dei sistemi laser anidride carbonica impiegata in neurochirurgia si è evoluta drasticamente, passando dai primi ingombranti modelli a “linea di vista” a sofisticate piattaforme integrate con la microchirurgia robotica (2)(3). Fondamentalmente il laser è costituito da tre componenti primarie: una sorgente di energia o eccitazione, un mezzo laser (in questo caso gassoso) e un sistema di specchi per la cavità ottica (3). I sistemi moderni, come lo SmartXide2, utilizzano sorgenti eccitate a radiofrequenza, che permettono emissioni ultrapulsate capaci di erogare una densità di energia superiore rispetto alle vecchie sorgenti a corrente

continua, migliorando l'efficacia dell'ablazione tissutale (2). Per quanto riguarda il sistema di erogazione la radiazione non può essere trasmessa attraverso le comuni fibre ottiche solide, perciò originariamente richiedeva l'uso di complessi bracci d'azione composti da tubi cavi e specchi riflettenti nelle articolazioni (6). Una rivoluzione strutturale è avvenuta con l'introduzione di fibre a banda proibita fotonica (PBF), fibre ottiche cave rivestite internamente da riflettori dielettrici omnidirezionali (i cosiddetti “specchi perfetti”), che permettono di guidare il raggio d'azione con la stessa manovrabilità di un bisturi o di una penna. Strutturalmente queste fibre cave consentono inoltre il passaggio di un flusso di gas elio inerte per raffreddare la punta e ripulire il campo operatorio da detriti e sangue. L'integrazione con il microscopio chirurgico avviene tramite un micromanipolatore ad alta precisione (come l'EasySpot Hybrid) e un'unità di scansione chirurgica (come l'HiScan Surgical), collegati mediante adattatori dedicati. Il raggio viene focalizzato dallo zoom ottico del micromanipolatore in spot micrometrici e mosso elettronicamente dallo scanner secondo traiettorie geometriche predefinite, garantendo una distribuzione controllata di energia e una profondità di taglio riproducibile. Il chirurgo posiziona il pattern del laser sul target controllando i movimenti di uno specchio terminale cardanico tramite un joystick, sul quale è spesso integrato un microinterruttore con la funzione di regolare i parametri di scansione senza dover interrompere il focus visivo sul campo operatorio (2).

Pertanto, in generale, un sistema laser a CO₂ è costituito da tre elementi fisici integrati in una struttura complessa:

- **Mezzo attivo e cavità ottica:** Il cuore del laser è un tubo contenente una miscela gassosa di anidride carbonica, azoto ed elio. All'estremità della

cavità sono posizionati due specchi allineati: uno totalmente riflettente e uno parzialmente riflettente che permette l'uscita del fascio.

- **Sorgente di eccitazione:** Nei sistemi moderni come lo SmartXide2, la sorgente è eccitata a radiofrequenza (RF). Questa tecnologia permette di generare impulsi “ultrapulsati” che consegnano al tessuto molta più energia per singolo impulso rispetto ai vecchi sistemi a corrente continua, rendendo l'ablazione più efficace e controllata (2).

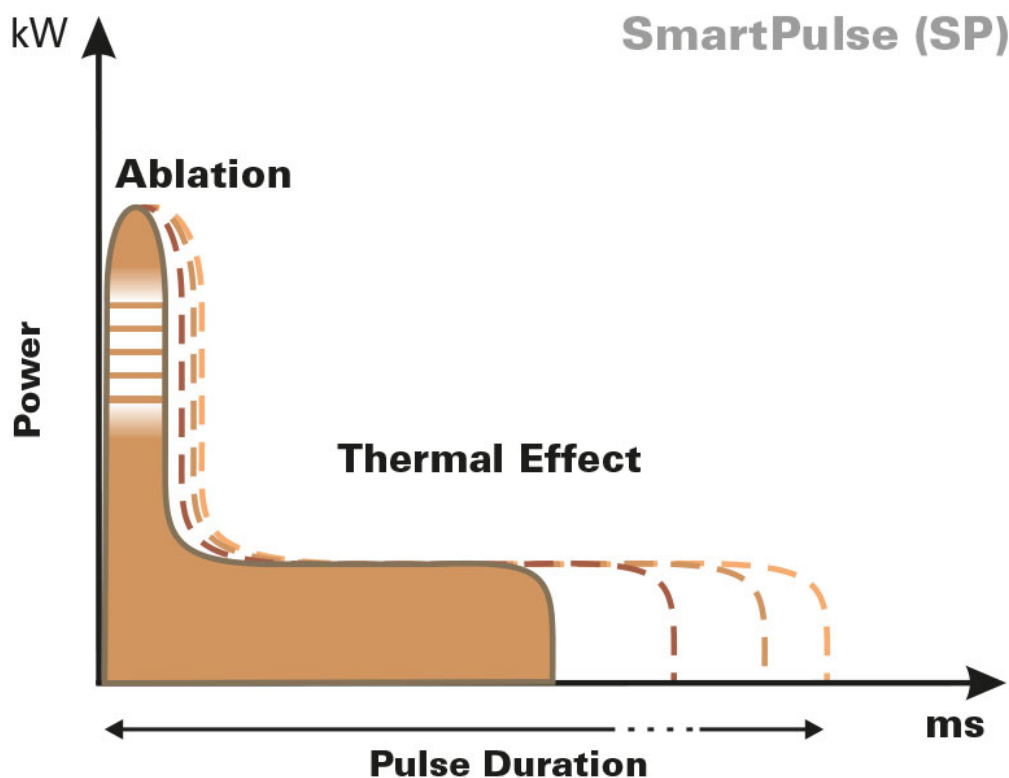


Figura 1 – Ablazione e denaturazione termica degli impulsi

- **Sistema di raffreddamento:** Il calore generato durante il processo di emissione viene rimosso attraverso un sistema di circolazione ad acqua che raffredda le pareti della cavità ottica.

1.1.2.1.2 IL RAGGIO GUIDA

Poiché la radiazione emessa dal laser a CO₂ ha una lunghezza d'onda di 10.600 nm (spettro infrarosso), quindi invisibile all'occhio umano, la testata laser ospita anche un secondo laser più piccolo all'elio-neon (He-Ne). Quest'ultimo emette una luce rossa visibile a 633 nm che viene sovrapposta al fascio CO₂ per agire come guida visiva costante per l'operatore sul target.

1.1.2.1.3 SISTEMI DI CONSEGNA E INTEGRAZIONE MICROCHIRURGICA

In neurochirurgia, il raggio non viene usato a mano libera, ma è integrato nel setup operatorio attraverso componenti strutturali specifiche:

- **Micromanipolatore ad alta precisione:** un dispositivo (come l'EasySpot Hybrid) collegato direttamente al microscopio operatorio tramite un adattatore dedicato (2). Grazie a uno zoom ottico, questo strumento focalizza il raggio laser in spot micrometrici (fino a 190 µm) sul campo operatorio.



Figura 2 - EasySpot Hybrid Micromanipulator

- **Scanner chirurgico robotizzato:** Un'unità (come l'HiScan Surgical) che muove automaticamente il raggio laser creando forme geometriche predefinite (punti, linee, spirali, esagoni). Questo sistema permette di controllare con estrema accuratezza la profondità dell'incisione e la permanenza del fascio (dwell time), minimizzando il danno termico laterale (2).



Figura 3 - HiScan Surgical

- **Joystick e Controlli:** Il chirurgo posiziona il laser muovendo uno specchio terminale cardanico tramite un joystick (2). Un microinterruttore sul joystick consente di controllare le funzioni dello scanner (come funzione e rotazione delle figure) senza mai distogliere lo sguardo dagli oculari del microscopio, riducendo l'affaticamento dell'operatore.



Figura 4 – Microinterruttore

1.1.2.1.4 STRUTTURE DI CONSEGNA ALTERNATIVE

Oltre all'integrazione con il microscopio, esistono altre configurazioni:

- Braccio articolato: un sistema meccanico di specchi che riflette il raggio verso manipoli a forma di penna per procedure a mano libera (2).
- Fibre ottiche cave flessibili: una tecnologia che permette di trasmettere l'energia laser attraverso fibre flessibili per raggiungere lesioni profonde o difficili da visualizzare in linea retta (2).

1.1.2.2 VARIETÀ DI APPLICAZIONI IN NEUROCHIRURGIA

1.1.2.2.1 PRIMA INTRODUZIONE IN SALA OPERATORIA NEUROCHIRURGICA

L'introduzione della tecnologia laser nell'ambito della neurochirurgia rappresenta un percorso evolutivo iniziato nella metà degli anni '60, segnando il passaggio

dalla sperimentazione fisica all'integrazione microchirurgica avanzata. I primi studi pionieristici furono condotti nel 1965 da Earle et al. e Fine et al., i quali indagarono gli effetti di impulsi di laser a rubino applicati al cranio di modelli animali, evidenziando inizialmente conseguenze esplosive dovute alla rapida espansione dei volumi intracranici. Il primo impiego clinico documentato in neurochirurgia fu riportato da Rosomoff e Carroll, che utilizzarono il laser a rubino pulsato su alcuni tumori cerebrali umani per indurre necrosi tissutale selettiva, ma non era ancora nata l'idea di testare questo strumento per l'effettiva asportazione della massa tumorale (5). La vera rivoluzione clinica fu resa possibile dall'invenzione del laser di anidride carbonica CO₂ da parte di Kumar Patel presso i Bell Labs nel 1964 (2)(3). Dopo un'intensa fase di ricerca sperimentale sulle proprietà neurochirurgiche del fascio a 10.600 nanometri condotte da Stellar e colleghi, il debutto del laser in sala operatoria neurochirurgica avvenne nel 1969, quando Stellar e Samra eseguirono la prima resezione di un glioblastoma multiforme. Nonostante i chiari vantaggi della tecnica "no-touch", l'adozione su larga scala fu inizialmente ostacolata dalla natura ingombrante dei primi sistemi di consegna "line-of-sight" e dalla necessità di utilizzare potenze elevate per vaporizzare masse tumorali voluminose e vascolarizzate (2)(5). Un momento di svolta strutturale si verificò nel 1976, quando Ascher e Heppner modificarono sostanzialmente l'assetto del laser: essi introdussero l'uso di un laser pilota all'elio-neon (He-Ne), di colore rosso visibile, per guidare il fascio infrarosso invisibile e, soprattutto, realizzarono il collegamento del sistema laser al microscopio operatorio. Questa integrazione trasformò in laser da un semplice "bisturi invisibile" a mano libera in un raffinato strumento neurochirurgico, consentendo ai chirurghi di operare con precisione millimetrica sulle lesioni profonde, nel tronco encefalico e alla base del cranio. Parallelamente, nel 1964, Geusic et al.

dimostrarono il funzionamento del laser Nd:YAG, che entrerà nella pratica neurochirurgica negli anni '70 e '80 per le sue superiori capacità coagulative e la possibilità di trasmissione tramite fibre ottiche flessibili (4)(5).

1.1.2.2.2 DIFFERENTI CASI DI IMPIEGO

L'impiego del laser ad anidride carbonica CO₂ nella neurochirurgia contemporanea abbraccia un vasto spettro di applicazioni, consolidandosi come uno strumento polivalente essenziale sia nella chirurgia oncologica che in quella funzionale e spinale (9). In ambito **neuro-oncologico**, il laser è considerato ideale per la resezione di **tumori extra-assiali** critici, tra cui meningiomi della base cranica (petro-clivali e del forame magno), craniofaringiomi e schwannomi vestibolari, dove la tecnica “no-touch” permette di vaporizzare la massa riducendo al minimo la trazione sui nervi cranici e sul tronco encefalico (2)(5). Un'applicazione di particolare rilievo riguarda i **tumori intraventricolari**, quali ad esempio i papillomi del plesso corioideo: grazie alla sua capacità di vaporizzare materiali cellulari neoplastici calcifici e fibrosi, il laser permette di trattare lesioni resistenti ai comuni aspiratori ultrasonici, garantendo al contempo l'emostasi dei piccoli vasi intratumorali (3). Per quanto concerne le **lesioni intra-assiali**, il laser viene utilizzato con precisione micrometrica per eseguire l'incisione piaie iniziale (corticotomia) e, attraverso l'integrazione con sistemi stereotassici computerizzati, per la resezione volumetrica “layer-by-layer” di gliomi e metastasi profonde, minimizzando il danno termico ai tessuti sani adiacenti. In **chirurgia spinale**, il laser rappresenta il gold standard per il trattamento dei tumori intramidollari (astrocitomi ed ependimomi), poiché consente il debulking interno della lesione senza manipolazione meccanica del midollo spinale thinned-out. Ulteriori

applicazioni spinali includono procedure di detethering del midollo spinale, la rimozione di meningiomi e schwannomi spinali, e l'asportazione rapida del tessuto adiposo in casi complessi di lipomielomeningocele (2)(3)(5). Nel campo della **neurochirurgia funzionale**, il laser viene impiegato per procedure neuroablativo volte al controllo del dolore cranico, come la creazione di lesioni nella Dorsal Root Entry Zone (DREZ) e le mielotomie commissurali. Trova inoltre spazio nella chirurgia dell'epilessia, dove viene utilizzato per vaporizzare o incidere foci epilettogeni situati in prossimità di aree eloquenti, riducendo l'incidenza di crisi postoperatorie grazie alla minore natura epilettogena del danno da laser rispetto a quello prodotto dagli strumenti convenzionali (5). Infine, la sua capacità di sigillare simultaneamente vasi sanguigni di piccolo calibro, linfatici e terminazioni nervose, lo rende uno strumento eccellente per l'emostasi della cavità chirurgica e la dissezione di tessuti cicatriziali in caso di recidive, migliorando drasticamente la visibilità del campo operatorio (6).

1.1.2.2.3 MIGLIORAMENTO DELLA PROGNOSI CON L'UTILIZZO DEL LASER

L'impiego della tecnologia laser ad anidride carbonica CO₂ ha dimostrato di offrire vantaggi prognostici superiori rispetto agli approcci chirurgici tradizionali in specifiche casistiche neurochirurgiche, grazie alla sua capacità di minimizzare il trauma meccanico e il danno termico collaterale. La superiorità clinica emerge in particolare nel trattamento di **lesioni profonde, altamente vascolarizzate o fibrotiche**, in cui gli strumenti convenzionali come l'aspiratore ultrasonico o la pinza bipolare possono risultare meno efficaci o più rischiosi (3)(9). Una delle casistiche in cui il laser può favorire un miglioramento della prognosi riguarda i

tumori intraventricolare calcifici e vascolarizzati, come i papillomi del plesso corioideo. In questi casi, in cui la massa tumorale può risultare estremamente tenace e resistente alle tecniche ormai standardizzate di debulking, l'utilizzo di fibre laser a PBF può permettere di vaporizzare il materiale cellulare neoplastico e di cauterizzare simultaneamente le strutture microvascolari, riducendo drasticamente il trauma meccanico da trazione e il sanguinamento intraoperatorio. Analogamente, nel trattamento di lesioni vascolari complesse, come i **tumori del glomo giugulare**, l'uso del laser è stato associato ad una significativa riduzione delle perdite ematiche e ad un recupero postoperatorio più rapido, grazie alla minore formazione di edema nel letto chirurgico rispetto all'uso di elettrocauterio bipolare ed aspiratore ad ultrasuoni. In ambito **neuro-oncologico extra-assiale**, il laser è considerato vantaggioso per la rimozione di meningiomi e schwannomi vestibolari situati in aree eloquenti o in prossimità del tronco encefalico e dei nervi cranici (2)(5). Studi comparativi hanno evidenziato che i pazienti operati con la tecnica laser presentano una minore morbidità e una maggiore qualità di vita, poiché la tecnica “no-touch” evita la manipolazione diretta delle strutture nervose vitali. Inoltre, nella **chirurgia spinale intramidollare**, il laser consente di effettuare una resezione radicale con il minimo trauma meccanico possibile su un midollo spinale già compresso e assottigliato dal processo espansivo, ponendo le basi per una prognosi funzionale migliore rispetto alle tecniche di dissezione meccanica. Ulteriori ambiti di eccellenza includono:

- **Chirurgia dell'epilessia:** l'incisione laser è considerata meno epilettogena rispetto a quella prodotta da strumenti convenzionali, poiché la cicatrice gliotica perilesionale che produce risulta meno irritativa rispetto a quella prodotta dalla chirurgia open, risultando quindi in una minor incidenza di crisi comiziali postoperatorie.

- **Trattamento delle recidive:** il laser è eccezionalmente efficace nella dissezione dei tessuti cicatriziali fibrosi che si riscontrano negli interventi di revisione, facilitando l'identificazione dei piani di clivaggio tra tumore e parenchima sano (2)(5).
- **Chirurgia spinale pediatrica:** in procedure come il detethering del midollo spinale o la rimozione di lipomi spinali, il laser riduce i tempi operatori e la manipolazione delle radici nervose, limitando la comparsa di complicanze neurologiche ed urologiche (3).

1.1.2.2.4 INDICAZIONI CLINICHE E LIMITI OPERATIVI

Il laser ad anidride carbonica rappresenta storicamente uno degli strumenti più significativi nella chirurgia del sistema nervoso centrale grazie alle sue proprietà fisiche peculiari. A seconda della tipologia della lesione in esame e delle caratteristiche intrinseche del paziente, questa metodica può presentare differenti indicazioni cliniche e limiti operativi.

1.1.2.2.4.1 INDICAZIONI IN BASE ALLA TIPOLOGIA DI LESIONE

Le indicazioni elettive del laser variano significativamente a seconda della natura e della localizzazione della patologia:

- **Lesioni extra assiali e della base cranica:** È considerato uno strumento d'eccellenza per la rimozione di meningiomi (basali, della falce, del forame magno), schwannomi vestibolari e craniofaringiomi. La capacità del laser di vaporizzare le cellule tumorali e al contempo coagulare piccoli vasi

nutritizi permette di operare in corridoi stretti senza esercitare trazione meccanica su nervi cranici e tronco encefalico (2)(5).

- **Lesioni intramidollari:** Nella chirurgia dei tumori intramidollari (astrocitomi, ependimomi) il laser consente di eseguire mielotomie precise e debulking tumorale minimizzando la manipolazione del midollo spinale e riducendo così il rischio di deficit motori post-operatori. È inoltre efficace nel trattamento dei lipomi spinali pediatrici, facilitando il distacco del conus medullaris del tessuto fibro-adiposo (3).
- **Lesioni intraventricolari e calcificate:** L'avvento di fibre ottiche flessibili a banda proibita fotonica (PBF) ha esteso l'uso del laser alle resezioni di lesioni profonde e massivamente calcificate, come i papillomi del plesso corioideo, che risultano spesso resistenti all'aspiratore a ultrasuoni (3)(10).
- **Procedure funzionali e ablative:** il laser viene impiegato per creare lesioni precise nella zona di ingresso delle radici dorsali (DREZ) per il trattamento del dolore cronico deafferentato e delle lesioni corticali nella chirurgia dell'epilessia (5).

1.1.2.2.4.2 PERSONALIZZAZIONE DEL TRATTAMENTO

La scelta di utilizzare una tecnologia laser può dipendere da specifici profili clinici:

- **Pazienti pediatrici:** Utile nelle procedure di detethering midollare per la sua delicatezza d'azione (3).
- **Pazienti anziani o con comorbidità:** la termoterapia interstiziale indotta da laser (LITT), guidata dalla risonanza magnetica, rappresenta un'opzione alternativa per pazienti non idonei alla chirurgia open che presentano gliomi ricorrenti o tumori profondi di piccole dimensioni (4)(8).

- **Lesioni in aree eloquenti:** il laser è preferibile quando la lesione è adiacente a strutture neurologiche critiche (corteccia motoria, centri del linguaggio), poiché la precisione del fascio riduce il rischio di edema perilesionale e danni collaterali (11).

1.1.2.2.4.3 LIMITAZIONI E CRITICITÀ TECNICHE

Nonostante i vantaggi, l'impiego del laser presenta limiti strutturali e clinici che ne condizionano l'uso:

- **Emostasi dei grandi vasi:** Poiché la sua lunghezza d'onda viene assorbita superficialmente dall'acqua, esso è efficace nel sigillare solo piccoli vasi con diametro inferiore a 0,5-1 mm. Di conseguenza è controindicato come strumento primario di emostasi in lesioni massivamente vascolarizzate o in presenza di emorragia da vasi di medio e grosso calibro, dove la cauterizzazione bipolare rimane lo standard indispensabile (6).
- **Manovrabilità ed ergonomia:** Storicamente, i sistemi a braccio articolato limitavano la destrezza del chirurgo in spazi angusti. Sebbene le nuove fibre flessibili e i micromanipolatori assistiti da scanner abbiano mitigato il problema, la curva di apprendimento rimane significativa (2).
- **Visualizzazione e carbonizzazione:** L'eccessivo calore può causare la carbonizzazione (charring) dei margini di tissutali, oscurando così l'interfaccia tra il tumore e il tessuto sano e rendendo difficile per il chirurgo distinguere i confini della lesione rispetto all'uso dell'aspiratore a ultrasuoni (8).

- **Costi e manutenzione:** L'elevato costo delle apparecchiature e la fragilità di alcuni sistemi di trasmissione rappresentano una barriera economica per l'adozione di routine (7).

1.1.2.2.4.4 CONTROINDICAZIONI RELATIVE

La natura stessa dell'interazione laser-tessuto può rappresentare una controindicazione relativa in determinate casistiche e patologie:

- **Lesioni intraventricolari:** sebbene utile per il debulking di tumore calcifici come i papillomi del plesso corioideo, la generazione di detriti durante la vaporizzazione può causare **meningiti chimiche asettiche** nel post-operatorio, una complicanza che richiede un'attenta valutazione della fattibilità dell'intervento (3).
- **Procedure di terzoventricolostomia endoscopica (ETV):** procedura neurochirurgica mini-invasiva utilizzata per trattare l'idrocefalo ostruttivo, in cui è stato segnalato il rischio di formazione di **aneurismi traumatici dell'arteria basilare** correlati al danno termico indotto dal laser durante la perforazione del pavimento del terzo ventricolo (8).
- **Pazienti con instabilità spinale o deficit motore gravi:** nella chirurgia dei dischi intervertebrali la discectomia laser percutanea è controindicata in pazienti che presentano segni di instabilità segmentale, stenosi spinale o sindrome della cauda equina. In questi casi la tecnica laser non è in grado di offrire la decompressione necessaria rispetto alla chirurgia convenzionale (4).
- **Pazienti in condizioni mediche critiche:** come per ogni procedura neurochirurgica complessa, uno stato di salute generale precario (Karnofsky

score <70) o una sopravvivenza attesa inferiore a 3-4 mesi rappresentano controindicazioni all'approccio chirurgico estensivo assistito da laser (8).

- **Gravidanza:** la gravidanza è considerata una controindicazione specifica per le procedure di discectomia laser percutanea (5).
- **Pazienti pediatrici di età inferiore a 4 anni:** sebbene il laser possa essere eccellente per il detethering midollare nei bambini, alcune tecniche di monitoraggio elettrofisiologico (come le onde D), necessarie durante l'ablazione laser di tumori intramidollari, non possono essere utilizzate dai bambini di età inferiore ai quattro anni, a causa dell'incompleta maturazione delle vie motorie, limitando la sicurezza della procedura (8).
- **Accessibilità della lesione:** L'impossibilità storica di trasmettere il fascio attraverso fibre ottiche e flessibili (limite parzialmente superato dalle recenti fibre a banda proibita fotonica) ha reso per lungo tempo controindicato l'uso del laser in lesioni profonde non raggiungibili in linea retta (line-of-sight); anche con le moderne tecnologie, la necessità di mantenere una distanza focale precisa e la potenziale perforazione accidentale di vasi nascosti dal tumore impongono estrema cautela e rappresentano un limite operativo in corridoi chirurgici angusti e profondi (2).

1.1.2.2.5 FASCE D'ETÀ E CASISTICHE PIÙ FREQUENTI

L'impiego della tecnologia laser in neurochirurgia abbraccia tutte le fasce d'età, dai neonati ai pazienti geriatrici, trovando applicazioni specifiche che variano in base alla biologia della lesione e alle necessità di preservazione funzionale proprie di ogni periodo della vita. L'evoluzione dai sistemi "line-of-sight" alle moderne fibre

flessibili e ai sistemi assistiti da scanner ha permesso di estendere queste indicazioni a casistiche un tempo considerate di difficile approccio.

In ambito **pediatrico e neonatale** il laser è considerato uno strumento di elezione per la gestione di malformazioni congenite e tumori tipici dell'infanzia:

- **Lipomi spinali e lipomielomeningoceli:** il laser è ritenuto lo strumento ideale per le procedure di detethering per la sua capacità di valorizzare il tessuto adiposo in modo rapido e preciso permettendo di liberare il conus medullaris e le radici della cauda equina riducendo drasticamente il trauma meccanico e la manipolazione delle strutture nervose (3).
- **Tumori del plesso coroideo:** rappresentano circa il 10-20% dei tumori cerebrali nel primo anno di vita e, data la loro natura estremamente vascolarizzata e spesso calcifica, in questa circostanza il laser consente di effettuare simultaneamente l'emostasi dei piccoli vasi ed un debulking efficace, facilitando la resezione in una popolazione di pazienti in cui la gestione della perdita ematica è critica (9).
- **Procedure endoscopiche:** Nei bambini affetti da idrocefalo ostruttivo o cisti intraventricolari multiloculate, il laser viene impiegato attraverso l'endoscopio per eseguire terzoventricolostomie o fenestrazioni settali (8).

Nell'**adulto e nel giovane adulto**, le casistiche più frequenti riguardano la chirurgia oncologica di precisione, dove l'obiettivo è la massimizzazione della resezione con il minimo danno collaterale:

- **Meningiomi e Schwannomi:** il loro trattamento mediante laser è largamente diffuso. Il laser è particolarmente utile nei **meningiomi della base cranica (falcinei, petroclivali)** e negli **schwannomi vestibolari**, dove

la tecnica "no-touch" è fondamentale per preservare i nervi cranici e il tronco encefalico (2).

- **Gliomi intra-assiali:** L'uso del laser assistito da scanner permette incisioni piali precise e una vaporizzazione controllata strato per strato, riducendo l'edema perilesionale rispetto alle tecniche tradizionali (2).
- **Neurochirurgia Funzionale:** In pazienti giovani o adulti con **epilessia del lobo temporale mesiale**, l'ablazione termica interstiziale laser (LITT) guidata dalla RM è diventata una casistica frequente, offrendo un'alternativa mininvasiva alla lobectomia temporale. Per il dolore cronico, il laser è utilizzato per creare lesioni precise nella **DREZ** (Dorsal Root Entry Zone) (11).

Nei pazienti **della fascia geriatrica** (spesso definiti come >65-70 anni), il laser offre soluzioni per casi complessi dove la chirurgia a cielo aperto potrebbe essere controindicata a causa delle plurime comorbidità patognomoniche:

- **Termoterapia Interstiziale (LITT):** Rappresenta un'opzione **palliativa o adiuvante** per il controllo della crescita tumorale in pazienti anziani con **gliomi ricorrenti** o metastasi profonde non suscettibili di re-intervento invasivo (4).
- **Metastasi Cerebrali:** Il laser viene impiegato per la resezione rapida e relativamente esangue di lesioni metastatiche, riducendo i tempi operatori in pazienti con prognosi limitata o stato di salute precario (8).

In sintesi, mentre nel bambino prevalgono le indicazioni per malformazioni e tumori ventricolari, nell'adulto e nell'anziano l'enfasi si sposta sulla chirurgia oncologica complessa e sulle tecniche ablativemininvasive.

1.1.2.3. ISTRUZIONI PER L'USO

Di seguito si riportano le istruzioni per l'uso del laser ad anidride carbonica CO₂, in particolare dello specifico modello che viene utilizzato nella **Clinica di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria "Umberto I" - Università Politecnica delle Marche di Ancona**.

1. PRENDERE VALIGETTA IN STUDIO DEL DIRECTOR
2. PRENDERE MACCHINA LASER NEL MAGAZZINO DEL BLOCCO (APPENA ENTRATI SULLA DESTRA)
3. PRENDERE IL MICROMANIPOLATORE NELLA VALIGETTA E MONTARLO SUL MICRO (STRINGERE FORTE IL PIRULINO GRIGIO)
4. SVITARE I TAPPI NERI E RIPORLI NELLA VALIGETTA
5. AVVITARE IL TUBO RIGIDO DELLA MACCHINA LASER AL MICROMANIPOLATORE MONTATO SUL MICROSCOPIO



*Figura 5-
macchina
laser*

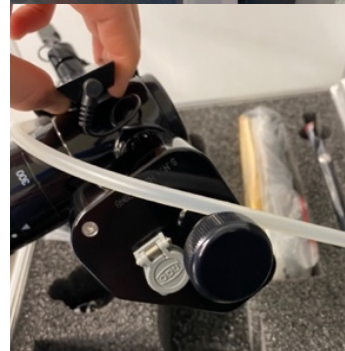


*Figura 6 –
micromanipo-
latore*



*Figura 7 –
tubo rigido*

6. VERIFICARE IL CORRETTO POSIZIONAMENTO DEL MICROMANIPOLATORE (RIVOLTO VERSO IL 1 OPERATORE , POSIZIONATO QUINDI SOTTO AGLI OCULARI DEL 1 OPERATORE)



Figura 8 –
direzionamento
micromanipolatore

7. ATTACCARE LA MACCHINA LASER ALLA CORRENTE E PER ACCENDERLA GIRARE LA CHIAVE DA 0 A 1



Figura 9 – chiave
di accensione

8. SCHERMATA INIZIALE: CLICCARE LA STELLA IN BASSO A SINISTRA E SELEZIONARE IL PROGRAMMA DESIDERATO (SOLITAMENTE “ESAGONO ABLAZIONE”) PREMERE QUINDI “IMPOSTA QUESTI DATI”



Figura 9 –
schermata
iniziale

9. SCHERMATA DI COMANDO: DA QUI SI PUÒ AUMENTARE LA POTENZA E LA PROFONDITÀ DEL LASER; SI METTE IN FUNZIONE IL LASER PREMENDO PRIMA “ON” E POI “PRONTO”. IL DISPLAY COMUNICHERÀ QUANDO IL LASER È PRONTO, SI ACCENDERÀ UNA LUCE ARANCIONE SOPRA AL DISPLAY E A QUEL PUNTO SARÀ POSSIBILE

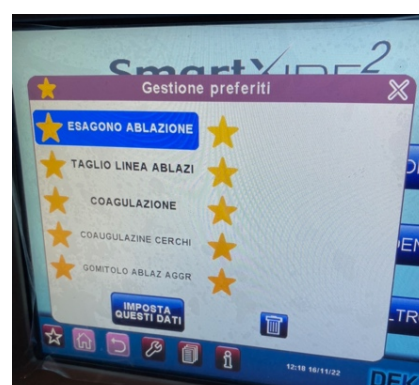


Figura 10 – schermata programmi

PREMERE IL PEDALE CHE
AZIONA IL LASER (IL PEDALE È
AGGANCIATO ALLA
MACCHINA LASER , HA UN
FILO LUNGO E PUÒ ESSERE
DATO

DIRETTAMENTE AL 1

OPERATORE)

10. DISPOSIZIONE FINALE:

FATENE BUON USO E NON

UTILIZZARE A SCOPO

ESTETICO

N.B: PER POTER VISUALIZZARE
BENE IL FASCIO DI LAVORO
DEL LASER

- NELLA SCHERMATA DI
COMANDO DEL LASER:
IMPOSTAZIONI→ FOCAL:
VERIFICARE CHE SIA 300 MM
- NEL PICCOLO DISPLAY DEL
MICROSCOPIO SOPRA AL PRIMO
OPERATORE E PREMENDO IL
TASTINO NELLA PARTE
LATERALE DEL MICROSCOPIO
BLOCCARE IL FUOCO A 300 MM



Figura 11 – schermata di comando



Figura 12 - laser



Figura 13 - laser in azione

2 PROCESSO CHIRURGICO

Il processo chirurgico che prevede l'impiego del laser ad anidride carbonica CO₂ in neurochirurgia si è evoluto da una tecnica puramente manuale e "line-of-sight" a un approccio altamente digitalizzato e integrato con sistemi di visualizzazione avanzata. L'integrazione di questa tecnologia segue un flusso operativo rigoroso, volto a massimizzare la precisione del taglio e dell'ablazione riducendo al minimo il trauma meccanico sui tessuti nervosi eloquenti (12).

2.1 GENERALITÀ SU PROCESSO OPERATIVO E INTEGRAZIONE TECNOLOGICA

Il workflow chirurgico inizia tipicamente con la **pianificazione della traiettoria**, spesso supportata da sistemi di neuronavigazione o stereotassici (come il sistema ClearPoint o StealthSystem) basati su immagini RM e TC preoperatorie (7)(11). Questi sistemi permettono di definire con precisione millimetrica i margini della lesione e di guidare l'accesso attraverso corridoi chirurgici angusti (5).

Nelle fasi iniziali dell'intervento, il laser a CO₂ viene utilizzato per eseguire **incisioni piali o corticotomie** estremamente precise. A differenza del bisturi tradizionale, l'uso del laser permette di vaporizzare il tessuto neoplastico e, simultaneamente, di ottenere un'**emostasi immediata dei piccoli vasi** (diametro < 1 mm) (9). Questa duplice azione è particolarmente vantaggiosa perché riduce la necessità di scambiare continuamente gli strumenti tra dissezione e coagulazione, abbreviando i tempi operativi (2).

Il cuore del processo chirurgico risiede nella **vaporizzazione volumetrica strato per strato**. Grazie all'impiego di **micromanipolatori assistiti da scanner**, il chirurgo non muove più il raggio laser a mano libera, ma posiziona pattern

geometrici predefiniti (come esagoni, linee o spirali) sull'area target. Il sistema sposta elettronicamente un micro-spot focalizzato (di circa 190 μm) ad altissima velocità, garantendo una distribuzione uniforme dell'energia che previene il surriscaldamento laterale e la carbonizzazione eccessiva (2)(12). Per proteggere le strutture sane adiacenti, vengono spesso utilizzati **cottonoidi umidi**, che fungono da barriera contro le radiazioni accidentali e il calore.

Nelle procedure condotte con fibre ottiche flessibili a banda proibita fotonica (PBF), il processo include l'erogazione costante di un **flusso di gas elio inerte** attraverso il nucleo cavo della fibra. Questo gas assolve a tre funzioni critiche: raffredda la punta della fibra, allontana fumo e detriti dal campo visivo e migliora l'efficienza della coagulazione. La visualizzazione durante queste manovre è garantita da **esoscopi 3D o microscopi operativi** collegati al sistema laser tramite adattatori dedicati, permettendo al chirurgo di operare in una postura ergonomica mentre controlla le funzioni di scansione tramite joystick (2)(12).



*Figura 14 – Esoscopio
3D in sala operatoria*



Figura 15 – struttura completa Esoscopia 3D



Figura 16 – Microscopio in sala operatoria



Figura 17 – struttura completa Microscopio

Infine, il laser è fondamentale per la **dissezione di tessuti fibrotici o cicatriziali** in casi di recidive, dove i piani anatomici sono distorti. Il processo si conclude con la toilette finale della cavità e la verifica dell'emostasi profonda, spesso ottenuta con densità di energia sub-ablative applicate direttamente sul letto tumorale (2).

2.2 I DETTAGLI DELLE VARIE FASI DEL PROCESSO CHIRURGICO

L'integrazione del **laser ad anidride carbonica (CO₂)** nel moderno workflow neurochirurgico non rappresenta semplicemente l'adozione di un nuovo strumento, ma un vero e proprio cambio di paradigma: il passaggio dalla manipolazione meccanica dei tessuti ad un'interazione basata sulla distribuzione digitale dell'energia (12). Questo processo chirurgico, estremamente raffinato, si articola in fasi sequenziali di precisione micrometrica, finalizzate a sfruttare la lunghezza

d'onda di 10.600 nm, che garantisce un assorbimento pressoché totale da parte dell'acqua tissutale, riducendo la penetrazione e il danno termico laterale a meno di 0,5 mm.

2.2.1 PIANIFICAZIONE PREOPERATORIA E CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA

La procedura ha inizio con una meticolosa pianificazione basata su imaging avanzato (RM e TC), integrata con sistemi di **neuronavigazione o stereotassici** per definire i corridoi d'accesso e i margini della lesione.



Figura 18 – neuronavigatore Stealth System

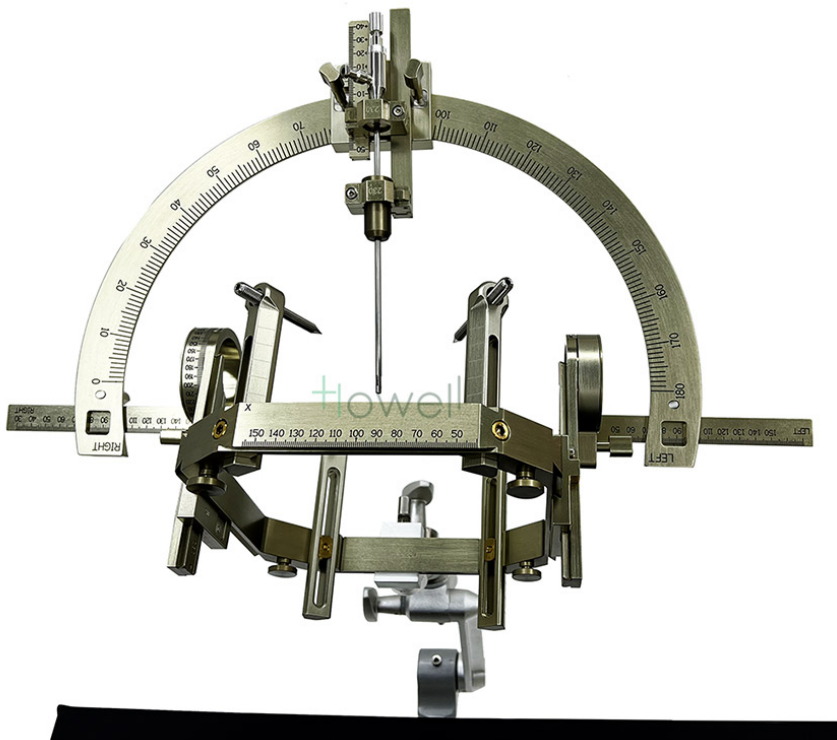


Figura 19 – sistema di telaio stereotassico

Una volta in sala, il setup tecnologico è cruciale: la sorgente laser, eccitata a radiofrequenza per permettere emissioni ultrapulsate ad alta energia, viene accoppiata otticamente al sistema di visualizzazione primaria. L'integrazione con l'**esoscopio 3D** (come il VITOM Eagle) o il microscopio operatorio avviene tramite adattatori dedicati che assicurano la perfetta coincidenza dell'asse ottico con la traiettoria del raggio laser (2)(12). In questa fase, è fondamentale proteggere le aree non target del campo operatorio con cottonoidi umidi, che fungono da barriera termica e fisica contro radiazioni accidentali o gas caldi prodotti dalla vaporizzazione.

2.2.2 CALIBRAZIONE E FOCALIZZAZIONE GUIDATA ("FOUR-DOT AID")

Prima di procedere all'ablazione, il sistema richiede una fase di calibrazione millimetrica del micromanipolatore assistito da scanner. Utilizzando la procedura guidata definita "**four-dot focusing aid**", il chirurgo visualizza quattro punti luminosi sul piano chirurgico; la loro sovrapposizione indica il raggiungimento del piano focale ottimale (12). A una distanza focale operativa standard di 300 mm, il sistema produce un micro-spot di circa 190 μm . Questa calibrazione garantisce che l'altissima densità di energia necessaria per superare la soglia di ablazione sia concentrata esattamente dove richiesto dal chirurgo, garantendo al contempo la massima precisione dei margini (3).

2.2.3 FASE DI INCISIONE: PIALTOMIA E CORTICOTOMIA DI PRECISIONE

L'intervento prosegue con la fase di approccio alla lesione (es. nei tumori intra-assiali) tramite incisioni piali o corticotomie. In questa fase, il laser viene impostato in modalità ultrapulsata, erogando solitamente una potenza di circa 6 W con tempi di permanenza (*dwell time*) di 1,5 ms (2). L'uso del laser permette di eseguire tagli netti senza esercitare alcuna trazione meccanica sui vasi corticali o sulle fibre neurali sottostanti, riducendo drasticamente il rischio di edema perilesionale rispetto all'uso del bisturi freddo o della pinza bipolare (9). Il chirurgo comanda il raggio tramite un joystick integrato nel micromanipolatore, regolando i parametri di scansione attraverso un micro-switch senza mai distogliere lo sguardo dal monitor dell'esoscopia o dagli oculari del microscopio (12).

2.2.4 ABLAZIONE VOLUMETRICA E DEBULKING ASSISTITO DA SCANNER

Il cuore del processo è l'**ablazione volumetrica strato per strato (layer-by-layer)**. Invece di muovere il raggio a mano libera — modalità storicamente soggetta a irregolarità e surriscaldamenti locali — il sistema scanner genera elettronicamente pattern geometrici predefiniti (esagoni, spirali o linee) ad altissima velocità (12). Per il debulking tumorale, viene tipicamente utilizzato il pattern a esagono in modalità continua, con potenze intorno ai 15 W e *dwell time* minimi di 0,1 ms (2). Questa modalità assicura una distribuzione dell'energia perfettamente uniforme sulla superficie target, massimizzando l'efficacia della vaporizzazione e prevenendo la carbonizzazione dei tessuti circostanti. Nei tumori calcificati, come i papillomi dei plessi coroidei, il laser vaporizza la componente cellulare vascolarizzata, permettendo successivamente di frammentare e rimuovere la componente ossea/calcifica con micro-frese (3).

2.2.5 DISSEZIONE "NO-TOUCH" E GESTIONE DELLE STRUTTURE ELOQUENTI

Nelle fasi di dissezione profonda, specialmente in prossimità di nervi cranici o del tronco encefalico, si sfrutta la tecnica "**no-touch**". Il laser permette di "shavare" (radere) il tumore dalle membrane neurali o dalle radici nervose senza esercitare manipolazione meccanica, che potrebbe causare deficit funzionali permanenti. In procedure condotte in corridoi angusti, l'uso di **fibre ottiche flessibili** a banda proibita fotonica (PBF) permette di portare l'energia laser anche dove non vi è una linea di vista retta. Durante l'uso della fibra, un flusso costante di gas elio inerte viene erogato attraverso il nucleo cavo per raffreddare la punta, allontanare il fumo dal campo visivo e migliorare la visibilità operativa (3).

2.2.6 EMOSTASI SUPERFICIALE E TOILETTE DELLA CAVITÀ

L'ultima fase è dedicata alla stabilizzazione del letto operatorio. Sebbene il laser a CO₂ non possa sostituire la coagulazione bipolare per vasi superiori a 1 mm, esso è formidabile nel sigillare **feeders arteriosi millimetrici e piccoli vasi ipervascolarizzati** (6). Utilizzando densità di energia sub-ablative (circa 0,6 W in modalità continua) e pattern specifici come il "cue-ball", il chirurgo induce una fotocoagulazione diffusa che rende il campo operatorio esangue e riduce il rischio di complicanze post-operatorie come il re-sanguinamento. Il processo si conclude con un'abbondante irrigazione della cavità per rimuovere eventuali residui della vaporizzazione, prevenendo meningiti chimiche asettiche (2).

3 OGGETTO E SCOPO DELLO STUDIO

Il presente elaborato si propone di analizzare l'integrazione clinica e tecnologica del sistema laser ad anidride carbonica CO₂ all'interno dell'attività operatoria della **Clinica di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria "Umberto I" - Università Politecnica delle Marche di Ancona**. L'indagine si focalizza sull'adozione di un paradigma chirurgico innovativo che vede l'impiego della piattaforma laser **SmartXide2 TRIO** (DEKA, Calenzano, Italia) in combinazione sinergica con sistemi di visualizzazione che si avvalgono principalmente di microscopio 3D ad alta definizione e secondariamente anche di esoscopio 3D specificamente il modello **VITOM Eagle** (Karl Storz, Tuttlingen, Germania). L'oggetto principale del lavoro risiede nella valutazione critica di questo setup integrato, il quale mira a superare i limiti storici della tecnologia laser in neurochirurgia, quali l'ingombro ergonomico dei bracci articolati e la variabilità dei risultati legata alla manualità del chirurgo, introducendo un approccio basato sull'interazione tissutale mediata da pattern di scansione digitale.

3.1 OGGETTO DI RICERCA

L'oggetto della ricerca si estende all'analisi retrospettiva e osservazionale di una serie di procedure chirurgiche condotte su pazienti affetti da diverse tipologie di lesioni intracraniche e spinali, tra cui **schwannomi vestibolari, metastasi cerebrali, gliomi, meningiomi della base cranica (petroclivali e del forame magno) e tumori midollari**. Il lavoro analizza minuziosamente come il laser a CO₂, caratterizzato da una lunghezza d'onda di 10.600 nm e da un assorbimento elettivo da parte dell'acqua tissutale, venga utilizzato non come strumento isolato, ma come parte integrante di ogni fase dell'intervento: dall'incisione piale iniziale alla vaporizzazione volumetrica del nucleo tumorale (*debulking*), fino alla dissezione fine delle interfacce tra tumore e strutture nervose sane e alla toilette finale del letto operatorio per l'emostasi dei piccoli vasi. Particolare enfasi viene posta sull'uso del **micromanipolatore EasySpot Hybrid** e dello **scanner HiScan Surgical**, che permettono di tradurre l'energia laser in geometrie di ablazione controllate (esagoni, spirali, linee), garantendo una precisione micrometrica con un danno termico laterale inferiore a 0,5 mm.

3.2 SCOPO DEL LAVORO

Lo scopo fondamentale del lavoro è dimostrare la fattibilità, la sicurezza e la riproducibilità di questo "paradigma ibrido", in cui il puntamento chirurgico guidato dall'uomo si sposa con l'erogazione dell'energia regolata dal sistema digitale. Attraverso l'analisi dell'esperienza condotta nel reparto di Ancona, si intende verificare se l'integrazione tra laser assistito da scanner e microscopio possa effettivamente ridurre la manipolazione meccanica dei tessuti critici (tecnica *no-touch*), minimizzare il trauma iatrogeno e migliorare l'ergonomia operativa per l'equipe chirurgica. Lo studio mira, inoltre, a definire i parametri operativi ottimali

— quali potenza, tempi di permanenza (*dwell time*) e densità di scansione — per diverse finalità chirurgiche, testati preliminarmente in sessioni di laboratorio su campioni animali e successivamente validati in ambito clinico su tessuto umano. In conclusione, l'elaborato si prefigge di delineare una nuova direzione per le tecniche neurochirurgiche basate sull'energia, evidenziando come la **digitalizzazione del raggio laser** e la sua sincronizzazione con l'asse ottico di visualizzazione avanzata rappresentino un avanzamento significativo verso una chirurgia minimamente invasiva e ad alta precisione. L'obiettivo finale è fornire un'evidenza clinica solida che possa supportare una più ampia adozione di queste tecnologie nel panorama neurochirurgico moderno, affrontando le criticità legate all'emostasi dei grandi vasi e ai costi tecnologici, ma sottolineando al contempo i benefici superiori in termini di preservazione delle strutture neurologiche eloquenti e di riduzione dell'edema post-operatorio.

4 MATERIALI E METODI

Il presente studio ha preso in considerazione una serie di pazienti sottoposta ad interventi in cui si è avvalsi dell'ausilio della metodica microchirurgica laser, nell'intervallo di tempo tra settembre 2022 e settembre 2025, presso la Clinica di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliera Universitaria - Ospedali Riuniti di Ancona. Sono stati inclusi 12 pazienti tutti maggiorenni, dei quali si disponeva della seguente documentazione clinico strumentale: lettera di dimissione, diagnostica per immagini, referti istopatologici, dettagli tecnici operatori, visite di controllo ambulatoriali post-operatorie.

4.1 MATERIALE CLINICO

Dalla documentazione clinica sono stati ricavati: dati anagrafici, diagnosi, sede di patologia, dimensioni volumetriche delle lesioni pre e post-intervento chirurgico, trattamento adiuvante chemio o radioterapico, presenza di deficit o miglioramento clinico nel follow-up, eventuale presenza di lesioni e recidive della lesione trattata. In particolare, è stata valutato il contingente riscontro di edema perilesionale al momento dell'indagine diagnostica neuroradiologica e la successiva sussistenza di eventi emorragici post-intervento. Questi ultimi due elementi sono stati analizzati al fine di dirimere in merito l'efficacia e l'utilità dell'utilizzo della metodica chirurgica laser nel trattamento di riscontri patologici con concomitanti complicanze emostatiche. Per quanto riguarda le complicanze post-intervento e il successivo follow-up clinico, sono state consultate le lettere di dimissione e i referti diagnostici di controllo per valutare la presenza o meno di complicanze chirurgiche e allo stesso modo la presenza di miglioramenti clinici rispetto all'ingresso. Sono stati analizzati anche l'eventuale utilizzo di terapie adiuvanti, quali radio o chemioterapia, e la presenza o meno di residui e recidive neoplastiche. Questi ultimi elementi sono stati valutati anche con l'integrazione del materiale neuroradiologico.

4.2 MATERIALE NEURORADIOLOGICO

È stato consultato il portale radiologico ospedaliero PACS GE per visualizzare le immagini e i referti della Risonanza Magnetica (RM) o, se non disponibili, della Tomografia Computerizzata (TC) preoperatoria per ottenere informazioni riguardanti le dimensioni della lesione e la sede. Per calcolare il volume è stata utilizzata la formula dell'ellissoide: $\frac{4}{3}\pi \times AP \times LL \times CC$, dove queste sigle

rappresentano rispettivamente i diametri massimi antero-posteriori, latero-laterali e cranio-caudali della lesione. Sono state visualizzate anche le immagini post-operatorie per valutare la presenza di complicanze chirurgiche e di residui neoplastici in situ. Inoltre, sono stati visualizzati quando disponibili gli esami radiologici eseguiti a distanza dall'intervento per individuare eventuali recidive di malattia.

4.3 MATERIALE ISTOPATOLOGICO

È stato ottenuto mediante l'analisi condotta dalla Clinica di Anatomia Patologica della medesima Azienda Ospedaliera, che ha permesso di definire la diagnosi istopatologica del tessuto tumorale, attraverso lo studio immunoistochimico e biomolecolare dei campioni.

4.4 MATERIALE CHIRURGICO

Le informazioni chirurgiche prese in analisi sono: il grado di resezione, ovvero se esso è stato totale/subtotale ($> 90\%$) o parziale ($\leq 90\%$) e le caratteristiche dell'approccio chirurgico utilizzato, presenza di complicanze post procedura richiedenti nuovo intervento.

4.5 ANALISI STATISTICA

L'analisi statistica è stata condotta mediante semplici programmi di calcolo.

Il numero particolarmente esiguo di pazienti, (12), ha reso possibile effettuare tutte le valutazioni numeriche percentuali attraverso metodiche base, veloci e semplici,

data la mancata necessità di calcoli lunghi e complessi, tipici di studi basati su un pool più esteso di partecipanti.

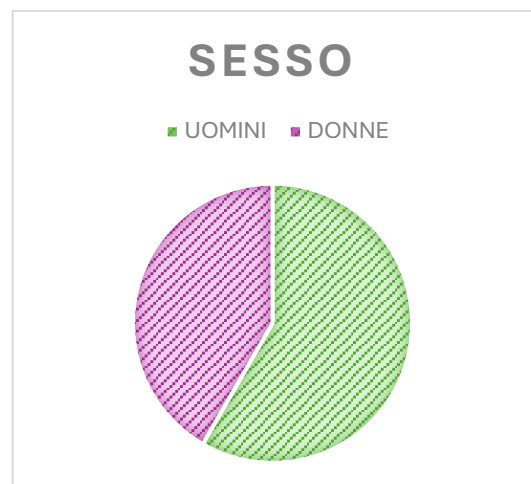
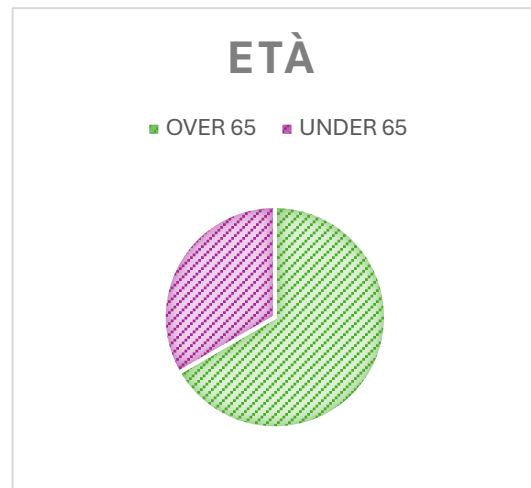
5 RISULTATI

5.1 RISULTATI CLINICI

Il nostro campione di 12 pazienti è composto da 7 uomini (58%) e 5 donne (42%), con un'età compresa tra i 29 e gli 81 anni e una media di 58 anni. Tra questi la maggior parte (66%) aveva meno di 65 anni, mentre la minoranza (33%) aveva un'età superiore a 65 anni.

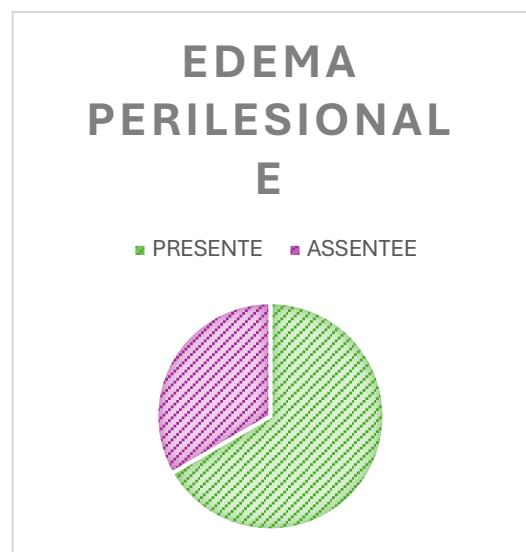
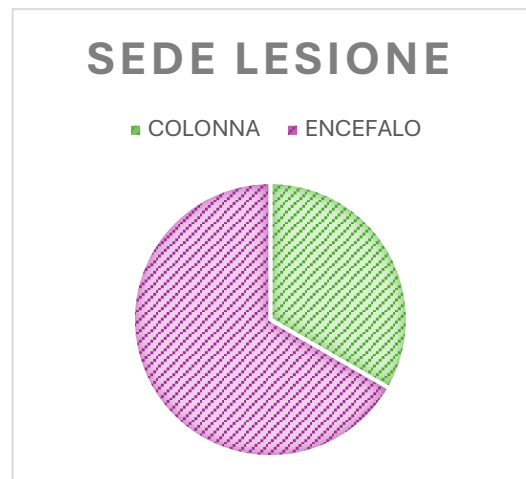
Le lesioni prese in esame erano localizzate nella maggioranza dei pazienti a livello encefalico (66%), e per la restante componente (33%) a livello della colonna.

Dalle presentazioni cliniche all'ingresso e dalle valutazioni preoperatorie è stata valutata la presenza di edema peri-lesionale. In 8 pazienti su 12, il 66%, è stata verificata, grazie all'ausilio della



diagnostica per immagini stadiatoria pre-intervento, l'esistenza di edema **vasogenico**, un fenomeno che si verifica a causa dell'interruzione dell'integrità della barriera emato-encefalica (BBB).

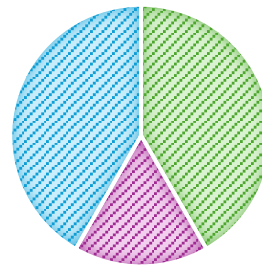
La perdita di selettività delle giunzioni endoteliali consente il passaggio di proteine plasmatiche (siero) dal compartimento vascolare allo spazio extracellulare, che di conseguenza si espande, mentre le cellule circostanti rimangono inizialmente stabili (8). L'impiego clinico di sistemi laser avanzati ha dimostrato, mediante controlli radiologici post-operatori (TC e RM), una **rapida e marcata riduzione dell'edema perilesionale preesistente**. Questo decorso post-operatorio favorevole e la rapida risoluzione dell'effetto massa circostante sono stati documentati sia nella chirurgia dei meningiomi extra-assiali (es. meningiomi della falce) sia nella resezione di metastasi



cerebrali intra-assiali
particolarmente voluminose
(2). Un altro dato su cui è stata
posta particolare attenzione è
rappresentato dal riscontro o
meno di reperti emorragici
post-operatori. L'impiego della
tecnologia laser in
neurochirurgia contribuisce in

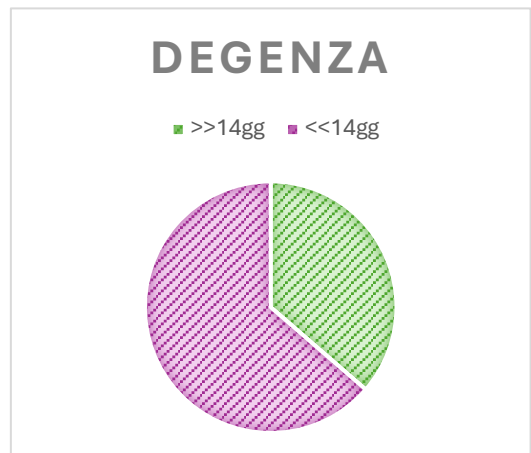
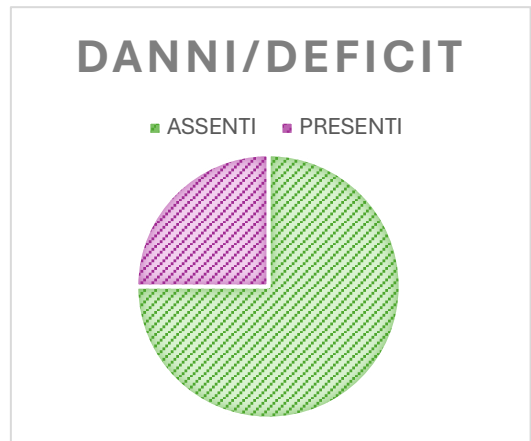
SANGUINAMENTO POST- OPERATORIO

■ assente ■ minimo ■ presente



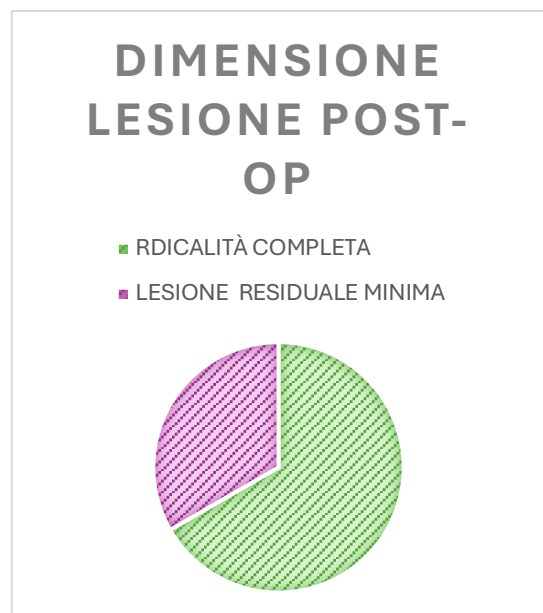
modo significativo alla riduzione delle perdite ematiche intraoperatorie e delle complicanze emorragiche post-operatorie, contrariamente alla chirurgia parenchimale tradizionale, che prevede la dissezione meccanica e l'uso di aspiratori, esponendo intrinsecamente il paziente a un rischio elevato di emorragia a causa della recisione dei piccoli vasi. L'interazione fisica del raggio laser con il tessuto biologico offre un'alternativa in grado di preservare l'integrità vascolare grazie a precisi meccanismi d'azione, producendo una fotocoagulazione immediata dei microvasi. Grazie all'utilizzo di questa metodica operatoria sono state riscontrate delle lesioni emorragiche di varia estensione al momento del controllo diagnostico post-intervento nei pazienti presi in osservazione. In particolare è stata rilevata l'assenza di sanguinamenti postoperatori nel 41,6% dei pazienti, la presenza di lesioni emorragiche di minima estensione nel 16,6% dei pazienti e di eventi emorragici di maggiore importanza ed estensione nel 41,6% dei casi. Altro dato valutabile, possibile indice della migliore prognosi garantita in interventi portati a termine mediante la metodica laser ,rispetto alla metodica classica, è caratterizzato dall'estensione del periodo di ricovero in reparto successivamente alla conclusione della

procedura operatoria. Si nota come in media la durata del ricovero sia prevalentemente inferiore ai 14gg, con una percentuale pari al 63,6%, mentre il 36,4% è stato caratterizzato da un periodo di degenza maggiore. In queste percentuali non è stata considerata la durata del ricovero di una sola dei pazienti presi in esame, dato il suo decesso nel post-operatorio dovuto a complicanze particolarmente rare e infrequenti. Inoltre risulta importante la valutazione dello stato del paziente nel follow-up post-intervento. In particolare è stato preso in analisi il riscontro di danni o deficit di nuova insorgenza, i quali sono stati appurati solo in 3 pazienti, determinando una percentuale di successo scevra da complicanze a medio-lungo termine pari al 75%.



5.2 RISULTATI NEURORADIOLOGICI

Le dimensioni delle lesioni prese in esame sono state valutate prendendo in considerazione il loro massimo diametro di estensione, in cm. Sono state valutate misurazioni pre- e post-intervento e l'estensione di eventuali lesioni residuali o recidivanti a distanza di tempo. Nelle immagini diagnostiche stadianti i vari tipi di lesione pre-intervento è possibile evidenziare come molte di queste avessero delle dimensioni cospicue, mediamente superiore ai 3 cm di diametro massimo. Nello specifico il 77% dei riscontri diagnostici ha evidenziato delle lesioni di dimensioni considerevoli, con un massimo rilevato pari a 7cm. Valutando le immagini di follow-up dei pazienti, per verificare lo stato e

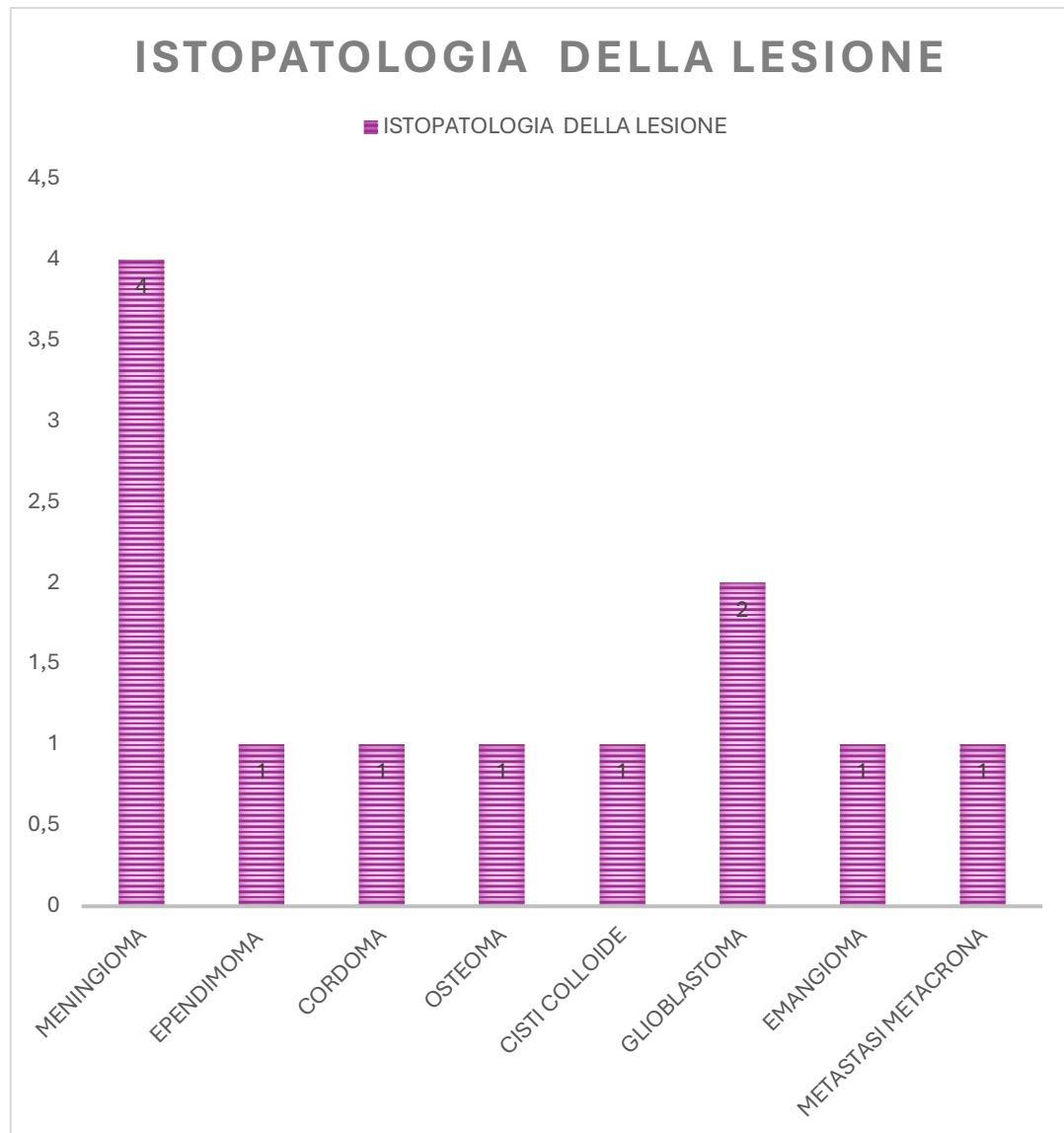


l'ampiezza delle lesioni a seguito del trattamento operatorio tramite metodica laser, si nota come nel 67% dei casi ci sia stata una radicalità completa della formazione presa in esame, con un 33% di pazienti che ha invece riportato la presenza di minime lesioni residuali in situ, variabili da un diametro min di 1,5cm ad uno massimo di 3,2cm. È stata valutata anche la presenza di recidive ed ingrandimenti delle eventuali lesioni residuali di cui prima, riscontrando un'evidenza di lesione recidivante, di diametro massimo significativamente maggiore di quello rilevato nella lesione residuale lasciata in sede, in uno solo dei pazienti facenti parte di questo studio.

5.3 RISULTATI ISTOPATOLOGICI

Dal punto di vista istologico, le lesioni più frequenti su cui si è deciso di intervenire, tramite l'utilizzo della metodica laser CO₂, sono state quelle meningiomatose, spaziando tra meningiomi di primo e di secondo grado, con una frequenza maggiore per quelle di grado inferiore. La scelta dell'utilizzo di questo strumento alternativo e mininvasivo, che è il laser a CO₂, è stata effettuata anche per il trattamento di lesioni di altra natura e diverso grado di gravità e malignità. Nonostante il piccolo gruppo di pazienti presi in osservazione, infatti, è possibile osservare come questa tecnica sia applicabile ad una pletera di diagnosi caratterizzate da reperti di diversa natura, entità e drammaticità, grazie alle particolari caratteristiche di mininvasività, precisione di escissione e ablazione, emostasi e migliore prognosi che il laser è in grado di assicurare. Pertanto grazie a questo strumento sono state trattate, nella **Clinica di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria "Umberto I" - Università Politecnica**

delle Marche di Ancona , neoformazioni di varia natura, includendo oltre ai meningiomi anche metastasi provenienti da tumori primari in altra sede, cordomi, osteomi, ependimomi, cisti colloidali, glioblastomi e lesioni angiomatose.

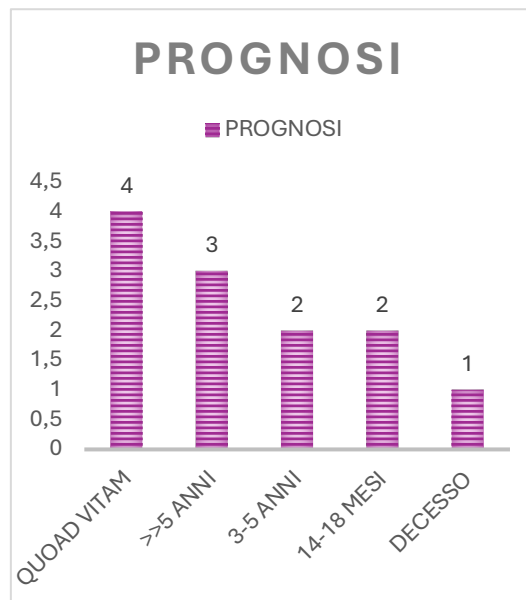
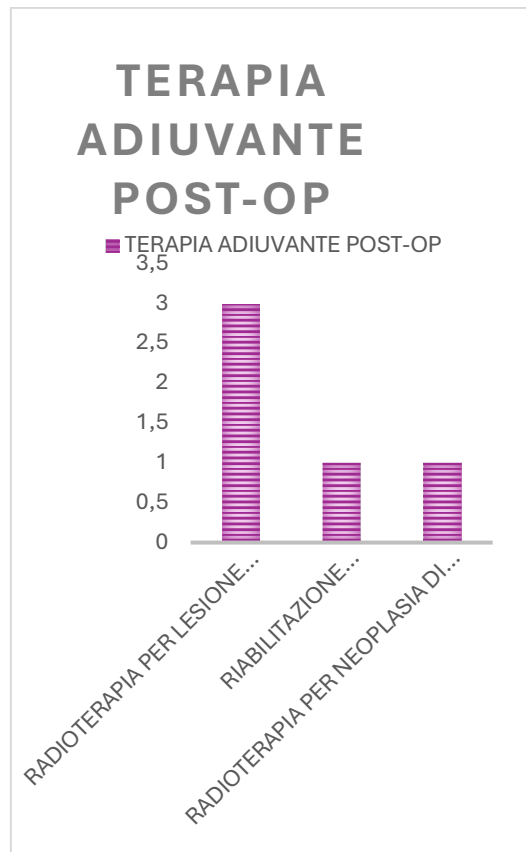


5.4 RISULTATI CHIRURGICI

È stata analizzata nel nostro campione la radicalità della resezione, in particolare se totale o maggiore o minore del 90% delle dimensioni iniziali. Nel 67% dei casi le resezioni sono state totali, riuscendo nell'asportazione completa della lesione e spesso nella risoluzione della patologia e della sintomatologia riportati dal paziente. Nei casi in cui non è stato possibile effettuare in sicurezza l'ablazione totale della massa non sono stati comunque riscontrati, nei follow-up di controllo a distanza, variazioni rispetto ai valori residuali misurati nell'immediato post-intervento. Solo in un paziente è stata riscontrata un aumento cospicuo di dimensioni del residuo lesionale lasciato in situ



in sede di intervento. Prendendo in considerazione questi dati è stata osservata inoltre la necessità di intraprendere terapie adiuvanti post-intervento. Queste si sono rese necessarie nel 41,6% dei casi, in particolare nei pazienti che presentavano reperti di masse residue, ma anche in casi di semplice riabilitazione, per la riacquisizione di abilità temporaneamente affievolite in seguito alla manipolazione chirurgica, e per contrastare il progredire di neoplasie maligne di alto grado. Infine è stata valutata la prognosi dei pazienti a seguito della procedura chirurgica. Secondo i dati al 58,3% dei pazienti è attribuibile un'aspettativa di vita superiore ai 5 anni, periodo preso come discriminante generale. Tra questi un'alta percentuale presenta una prognosi quoad vitam. Per quanto



riguarda invece il restante 41,7% che presenta una previsione di sopravvivenza inferiore ai 5 anni, una paziente risulta deceduta per complicanze rare e infrequenti a seguito dell'intervento, dei restanti pazienti il 50% presenta una prognosi di 14-18 mesi, mentre l'altro 50% una previsione di vita che va dai 3 ai 5 anni.

5.5 ANALISI STATISTICA

Tra i dati statistici più significativi emergono la scarsa tendenza al verificarsi di emorragie post-operatorie, la grande variabilità diagnostica di applicazione della metodica presa in esame, il breve periodo di degenza generale, la bassa incidenza di recidive e di danni o deficit a seguito della procedura. Tutti dati che permettono di riflettere in merito all'estesa possibilità di applicazioni di questa particolare e preziosa tecnica chirurgica.

6. DISCUSSIONE

L'analisi dei risultati clinici, neuroradiologici e tecnologici emersi da questo studio evidenzia come l'integrazione delle moderne tecnologie laser nel workflow neurochirurgico moderno rappresenti un fondamentale cambio di paradigma, segnando la transizione storica dalla manipolazione meccanica dei tessuti a un'interazione biofisica basata sulla distribuzione controllata e digitale dell'energia. La peculiarità fisica cardine del laser ad anidride carbonica CO₂ risiede nella sua lunghezza d'onda di 10.600 nm, situata nello spettro del lontano infrarosso, la quale presenta una straordinaria affinità per l'acqua, cromoforo primario e ubiquitario dei tessuti biologici molli (3). Questo assorbimento massivo e superficiale determina una conversione istantanea dell'energia luminosa in calore entro un volume tissutale estremamente ridotto, provocando la

vaporizzazione cellulare immediata a una temperatura relativamente bassa di circa 100°C (6). Dal punto di vista clinico, l'utilità di tale fenomeno si traduce in una precisione ablativa micrometrica associata a un danno termico laterale e a una disidratazione dei margini estremamente circoscritti, tipicamente inferiori a 0,5 mm. Questa spiccata selettività biologica distingue nettamente il laser a CO₂ da altre sorgenti, quali il Neodimio:YAG (Nd:YAG) operante a 1064 nm, il quale, penetrando molto più profondamente a causa dello scarso assorbimento da parte dell'acqua parenchimale, espone i tessuti neurali sani circostanti a un elevato rischio di lesioni termiche collaterali, necrosi o complicanze severe (3). Nonostante i chiari vantaggi biologici della tecnica "no-touch", l'adozione su larga scala del laser a CO₂ in neurochirurgia è stata storicamente limitata da severi vincoli ergonomici e strumentali, in particolare legati all'ingombro dei vecchi sistemi di trasmissione rettilinei "line-of-sight" dotati di bracci articolati e specchi, che riducevano drasticamente la destrezza e l'accessibilità del chirurgo all'interno di corridoi operatori angusti o profondi (12). Come ampiamente valutato nel corso della presente trattazione, tali limitazioni strutturali sono state brillantemente superate grazie a due innovazioni tecnologiche di ultima generazione: lo sviluppo di guide d'onda flessibili a banda proibita fotonica (PBF) e l'avvento di sistemi di scansione robotizzata assistiti da computer. Le fibre flessibili a PBF, caratterizzate da un nucleo cavo rivestito internamente da riflettori dielettrici omnidirezionali, consentono di convogliare l'energia del laser con perdite inferiori a 1.0 dB/m, trasformando il laser in uno strumento a basso profilo ed elevata manovrabilità paragonabile a una penna o a un bisturi, ideale per l'approccio a lesioni profonde o non raggiungibili in linea retta (10). Inoltre, la peculiarità strutturale delle fibre cave permette l'erogazione costante di un flusso di gas elio inerte che raffredda la punta della fibra, allontana fumi e detriti dal campo visivo e migliora direttamente

l'efficienza coagulativa. Nei contesti microchirurgici ad altissima precisione, l'introduzione di sistemi di scansione digitale (come la piattaforma SmartXide2 TRIO, dotata di scanner HiScan Surgical e micromanipolatore EasySpot Hybrid) ha eliminato l'intrinseca variabilità operatore-dipendente delle tecniche manuali a mano libera, dove la profondità dell'ablazione dipendeva inevitabilmente dalla velocità e dalla stabilità della mano del chirurgo. Grazie a sorgenti eccitate a radiofrequenza in grado di generare emissioni ultrapulsate ad alta energia, il raggio laser viene focalizzato in uno spot micrometrico di circa 190 μm e spostato elettronicamente ad altissima velocità secondo pattern geometrici predefiniti (quali esagoni, spirali o linee). Questo controllo digitale della permanenza del fascio (*dwell time* impostabile fino a 0,1 ms) garantisce una distribuzione dell'energia perfettamente uniforme e una profondità di ablazione riproducibile, minimizzando il surriscaldamento profondo e il rischio di sanguinamenti accidentali. L'eccellenza di questo setup si realizza nella sua integrazione sinergica con esoscopi 3D ad alta definizione (come il VITOM Eagle) tramite adattatori dedicati che allineano l'asse ottico di visualizzazione con il percorso del raggio, migliorando l'ergonomia per l'equipe operatoria, riducendo l'affaticamento del chirurgo ed eliminando la necessità della visione binoculare obbligata del microscopio tradizionale (12).

Sotto il profilo strettamente clinico, l'utilità di questo approccio integrato risiede nella possibilità di eseguire resezioni volumetriche e dissezioni piali o corticotomie estremamente precise senza esercitare alcuna forza di trazione o manipolazione meccanica sui tessuti cerebrali o spinali eloquenti adiacenti. Questa modalità preserva l'integrità delle strutture vascolari e neurali critiche e si associa a una fotocoagulazione immediata ed efficace dei microvasi e dei feeders tumorali sub-millimetrici (fino a 0,5-1 mm di diametro). Sigillando i piccoli vasi

contemporaneamente al taglio, il laser previene il trasudamento ematico (*oozing*) e mantiene pulito il campo operatorio, riducendo la necessità di scambiare ripetutamente gli strumenti con la pinza bipolare. I dati radiologici post-operatori confermano che questa interazione atraumatica si traduce in una rapida e marcata risoluzione dell'edema vasogenico perilesionale preesistente, senza evidenza di contusioni iatrogene cerebrali o spinali. Ciò rende l'uso del laser particolarmente vantaggioso nel *debulking* interno di neoformazioni tenaci, fibrose o massivamente calcificate (come meningiomi della base cranica, schwannomi vestibolari o papillomi dei plessi coroidei) che risulterebbero altrimenti refrattarie alle tecniche standard di aspirazione ultrasonica (4). Il chirurgo deve tuttavia prestare estrema cautela a non lasciare residui di tessuto carbonizzato (*charring*), i quali potrebbero innescare risposte infiammatorie locali, edema post-operatorio tardivo o ascessi sterili. Infine, la versatilità e l'utilità della tecnologia laser si estendono oltre la chirurgia oncologica e malformativa open verso ambiti funzionali e miniminvasivi di avanguardia. In parallelo, le potenzialità ottiche del laser si concretizzano in chiave diagnostica e preventiva con la flussimetria laser Doppler (LDF), che, utilizzando sorgenti a bassa potenza (tipicamente 780 nm), monitora in tempo reale la microcircolazione cerebrale. Attraverso la registrazione simultanea dei segnali di Perfusione e di intensità della luce totale riflessa (TLI) — quest'ultima dotata di un'altissima sensibilità nel discriminare i confini tra sostanza grigia e sostanza bianca — l'operatore può mappare le traiettorie stereotassiche profonde durante biopsie tumorali o impianti di elettrodi DBS, rilevando tempestivamente picchi di perfusione indicativi di strutture vascolari ad alto rischio emorragico prima del contatto fisico diretto e azzerando le complicanze emorragiche iatrogene. Nel nostro campione clinico di 12 pazienti (con un'età compresa tra 29 e 81 anni, media di 58 anni, e una prevalenza maschile

del 58%)¹⁴, le patologie trattate hanno interessato per il 66% il compartimento encefalico e per il 33% la colonna spinale, comprendendo un'ampia variabilità istologica: meningiomi di primo e secondo grado (i più frequenti), metastasi cerebrali, cordomi, osteomi, ependimomi, cisti colloidali, glioblastomi e lesioni angiomatose. Questa pletora diagnostica dimostra l'estrema versatilità dello strumento laser a CO₂, specialmente nel debulking interno di lesioni tenaci, fibrose o massivamente calcificate (come i papillomi del plesso coroideo intraventricolari o i meningiomi della base cranica), storicamente refrattari alle metodiche tradizionali come l'aspirazione ultrasonica (CUSA). La sua peculiare delicatezza d'azione trova riscontro nell'analisi dell'edema perilesionale, una complicanza vasogenica dovuta alla perdita di integrità della barriera emato-encefalica: l'83,3% delle volte (8 pazienti su 12) presentava edema vasogenico preoperatorio stadiato radiologicamente, mostrando nei controlli TC e RM post-operatori una rapida e marcata riduzione dello stesso, senza l'insorgenza di contusioni cerebrali o spinali iatrogene indotte dalla procedura. Come precedentemente affermato, un ulteriore elemento cardine valutato è il controllo emostatico: sigillando i vasi sanguigni di piccolo calibro (fino a 0,5-2 mm di diametro) contemporaneamente al taglio, riducendo le perdite ematiche intraoperatorie rispetto alla chirurgia parenchimale convenzionale. Nel nostro studio, l'assenza totale di sanguinamenti post-operatori immediati è stata registrata nel 41,6% dei pazienti, mentre lesioni emorragiche minime o di maggiore entità si sono verificate rispettivamente nel 16,6% e nel 41,6% dei casi²³, evidenziando come, per vasi superiori a 1 mm, la cauterizzazione bipolare tradizionale rimanga lo standard indispensabile. I vantaggi prognostici e di sicurezza della metodica si riflettono in una degenza ospedaliera post-operatoria contenuta (inferiore a 14 giorni nel 63,6% dei casi) e in un tasso di successo del 75% libero da deficit neurologici di nuova insorgenza

a medio-lungo termine, con un tasso di radicalità oncologica completa (GTR) pari al 67% e solo il 33% di minime lesioni residuali stabili (e un solo caso di recidiva documentata nel follow-up).

In conclusione, la digitalizzazione e la flessibilità della tecnologia laser, coniugate a un'approfondita comprensione delle interazioni biofisiche e termodinamiche, pongono le basi per una chirurgia neuro-oncologica e funzionale sempre più sicura, atraumatica e personalizzata. I dati del nostro studio monocentrico validano la digitalizzazione del raggio laser e l'interazione programmata basata su pattern come una frontiera clinica solida e sicura, capace di migliorare l'ergonomia chirurgica, massimizzare la radicalità della resezione e preservare l'outcome neurologico del paziente.

7. CONCLUSIONI

Questo studio clinico-sperimentale permette di giungere a conclusioni di rilevante interesse clinico e scientifico in merito all'utilizzo della tecnologia laser nella neurochirurgia mininvasiva. L'indagine retrospettiva monocentrica, interamente incentrata sull'attività chirurgica della Clinica di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria "Umberto I" - Ospedali Riuniti di Ancona, ha validato l'efficacia e la sicurezza della piattaforma laser ad anidride carbonica CO₂ SmartXide2 TRIO accoppiata a sistemi di visualizzazione avanzata (esoscopio 3D VITOM Eagle e microscopio operatorio) per la definizione di un innovativo paradigma ablativo ed emostatico. La valutazione sistematica condotta su un campione di 12 pazienti maggiorenni sottoposti a intervento tra settembre 2022 e settembre 2025 evidenzia come la digitalizzazione dell'energia laser possa

superare i limiti storici della tecnica a mano libera o dei bracci articolati specchiati, standardizzando i parametri terapeutici a vantaggio dell'outcome del paziente.

Sotto il profilo della versatilità clinica e istopatologica, il lavoro svolto dimostra l'applicabilità della metodica ad una pletera estremamente diversificata di lesioni intracraniche e spinali. Il campione in esame ha visto l'impiego del laser CO₂ per il trattamento di lesioni cerebrali (66%) e della colonna (33%), comprendendo meningiomi di primo e secondo grado, metastasi cerebrali, cordomi, osteomi, ependimomi, cisti colloidali, glioblastomi e lesioni angiomatose. Le rilevazioni volumetriche preoperatorie hanno evidenziato che il 77% dei pazienti presentava lesioni di dimensioni considerevoli, con un diametro massimo superiore a 3 cm e punte fino a 7 cm. In tali scenari, caratterizzati spesso da masse tenaci, fibrose o calcificate (come i papillomi del plesso coroideo intraventricolari o i meningiomi della base cranica), l'energia del laser a CO₂ ha permesso una vaporizzazione efficace della componente cellulare neoplastica, superando la resistenza strutturale che rende queste lesioni refrattarie alle metodiche tradizionali. I risultati neuroradiologici e clinici a medio-lungo termine confermano la delicatezza e l'elevato profilo di sicurezza della tecnica "no-touch", che riduce drasticamente lo stimolo iatrogeno locale. I controlli TC e RM post-operatori hanno mostrato una rapida e marcata riduzione dell'edema preesistente, escludendo l'insorgenza di nuove contusioni cerebrali o spinali indotte dalla procedura. Un capitolo cruciale delle conclusioni riguarda il bilancio del rischio emorragico perioperatorio, infatti, nel campione analizzato, si è registrata l'assenza totale di sanguinamenti post-operatori immediati nel 41,6% dei casi, mentre lesioni emorragiche di minima estensione ed eventi di maggiore rilevanza si sono verificati rispettivamente nel 16,6% e nel 41,6% dei pazienti. Tali evidenze confermano che, mentre il laser è

straordinariamente efficace nel sigillare piccoli vasi di calibro inferiore a 0,5-1 mm², la cauterizzazione bipolare classica rimane lo standard insostituibile per vasi di diametro superiore. Nonostante le limitazioni associate agli elevati costi di manutenzione, al rischio specifico di meningite chimica asettica per rilascio di detriti in procedure intraventricolari, o all'impossibilità di eseguire monitoraggi con onde D in pazienti pediatrici sotto i 4 anni per immaturità motoria, la tecnologia laser si consolida come uno strumento emostatico e ablativo di eccezionale valore.

In sintesi, il lavoro svolto convalida l'efficacia del "paradigma ibrido" nel trattamento di lesioni in campo neurochirurgico. L'esperienza della Clinica di Ancona traccia così una strada solida verso una neurochirurgia sempre più precisa, sicura ed ergonomica, indicando la digitalizzazione dei sistemi basati sull'energia come uno standard irrinunciabile per la preservazione funzionale e la cura delle patologie oncologiche e malformative del sistema nervoso centrale.

BIBLIOGRAFIA

1. Wright VC. *Laser Surgery: Using the Carbon Dioxide Laser*. Canadian Medical Association. (CMA) Journal, VOL.126, 1982.
2. Colasanti R, Giannoni L, Dallari S, et al. *Application of a Scanner-Assisted Carbon Dioxide Laser System for Neurosurgery*, *World Neurosurgery*, 153: e250-e258, 2021.
3. Malone HR, Syed ON, D'Ambrosio AL, et al. *Beneficial Use of a New Hand-Held CO₂ Laser Fiber in Resection of a Calcified and Vascular Intraventricular Tumor*, *World Neurosurgery*, 78: 191.e9-191.e14, 2012.
4. Lumenta C.B. *Is There Still a Place for LASER Technology in Modern Neurosurgery?*, *World Neurosurgery*, 80(5), e151-e152, 2013.
5. Krishnamurthy S, Powers SK. *Lasers in Neurosurgery*, *Lasers in Surgery and Medicine*, 15: 126-167, 1994.
6. Takac, S., Stojanović, S., & Muhi, B. *Types of medical lasers*, *Med Pregl*, 51(3-4), 146–150, 1998.
7. Wårdell K, Richter J, Zsigmond P. *Cerebral Microcirculation: Progress and Outlook of Laser Doppler Flowmetry in Neurosurgery and Neurointensive Care*. *Microcirculation*, e12884, 2024.
8. Greenberg MS. *Handbook of Neurosurgery*. 10th Edition. Thieme, 2023.
9. Syed RA, Al Hejji M, Homoud M. *CO₂ Laser in Neurosurgery: A Hands-on Experience*. *Journal of the College of Physicians and Surgeons Pakistan*, 28(6): S104-S106, 2018.
10. Malone HR, Syed ON, D'Ambrosio AL, McKhann GM II. Beneficial use of a new hand-held CO₂ laser fiber in resection of a calcified and vascular intraventricular tumor. *World Neurosurg.*; 78(1-2): 191.e9-191.e14. 2012.

11. Hwang BY, Eremiev A, Palla A, et al. Association of intraoperative end-tidal carbon dioxide level with ablation volume during magnetic resonance-guided laser interstitial thermal therapy for mesial temporal lobe epilepsy. *J Neurosurg*.; 137(2):427-433. 2022.
12. Giannoni L, Dallari S, Iacoangeli M. 3D Scanner-assisted CO2 laser ablation under exoscopic visualization in neurosurgery: scan-pattern-based tissue interaction as a new paradigm. *Neurosurg Rev*. 2026 (In press/Preprint).