

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
POSGRADO DE ORTOPEDIA Y TRAUMATOLOGÍA

TRANSPORTE ÓSEO

ACTUALIZACIÓN DE CONCEPTOS Y EVIDENCIA CIENTÍFICA ACTUAL

Trabajo final de graduación sometido a consideración del comité de la Especialidad en Ortopedia y Traumatología para optar por el grado y título de especialista en ortopedia y Traumatología

JERRIKA GENTLE TENCIO

2020

Dedicatoria

A la vida, por las oportunidades y circunstancias, que me han permitido forjar un carácter determinado, con anhelos y propósitos, y a su vez, me ha dado las herramientas para encontrar el camino hacia las metas trazadas.

A mi familia, por ser mi apoyo incondicional, mi principal motivación para mejorar y el propósito más importante de mi vida.

A mi mamá, por su ejemplo de perseverancia y su constante fe en los buenos resultados a futuro.

A mi hermano Abdel, por el sacrificio hecho años atrás para concluir mis estudios de pregrado.

A mi hermana Jenice, por su constante motivación y por recordarme que siempre es posible hallar el camino hacia la meta.

A mi prometido Alfredo, por enseñarme una forma diferente de ver la vida, y de disfrutarla, y por ese apoyo lleno de amor y paciencia, en los momentos de mayor estrés e inseguridad.

A mis mejores amigos, Alejandra, Rebeca, Sergio, Leo, Silvia, por ser mis compañeros de estudio, mi soporte emocional y un gran ejemplo de vocación y profesionalismo.

A mi tío Joaquín Tencio, quien aunque físicamente no comparte ese momento, su fe en mi, y sus buenos deseos, me han acompañado hasta este momento.

Agradecimientos

A mis profesores de pregrado, por darme las bases de conocimiento en medicina, que desde temprano despertaron mi interés por la cirugía.

Al doctor Fabricio Arguedas, por ser más que un buen profesor, un consejero, cuyas recomendaciones marcaron un antes y un después en mi formación como residente.

Al Doctor Max Méndez, por ser un excelente docente, con cualidades humanas que inspiran a una nueva visión de como llevar a cabo el día a día en el trabajo, por su ejemplo de serenidad y, excelencia académica y laboral.

Al doctor Orlando Daly y al doctor Javier Sevilla, por el tiempo y la dedicación brindado al aceptar ser mis lectores de tesis, por sus correcciones y recomendaciones que hicieron este trabajo posible.

A la doctora Adriana Oviedo, por ser la amiga que me heredó la residencia, un ejemplo de benignidad y compañerismo.

A todos los compañeros residentes y profesores del Posgrado de Ortopedia y Traumatología, por hacer de estos años de formación, una experiencia única, llena de aprendizaje y trabajo en equipo.

A la Universidad de Costa Rica, mi alma máter, por su invaluable labor académica, al buscar la excelencia académica, y su labor social, al garantizar el acceso a la educación de acuerdo al mérito.

Este trabajo final de graduación fue aceptado por el comité de la Especialidad de Ortopedia y Traumatología del Programa de Especialidades Médicas de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Especialista en Ortopedia y Traumatología.



Lidiana Avila de Benedicts

Representante del Decano de Estudios de
Postgrado



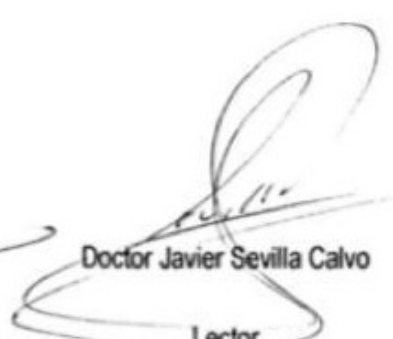
Doctor Luis Diego Rodríguez Carrillo

Coordinador de la Especialidad de Ortopedia y
Traumatología




Doctor Fabricio Arguedas Monge

Profesor Tutor



Doctor Javier Sevilla Calvo

Lector



Doctor Orlando Daly Mullins

Lector



Doctora Jemika Gentile Tencio

Sustentante

San José, 26 de junio del 2021

Universidad de Costa Rica

Facultad de Medicina

Posgrado en Especialidades Médicas

Estimados señores:

Por medio de la presente hago constar que yo, Guadalupe Vargas Díaz, cédula 11540013, filóloga española, miembro activo de ACFIL bajo el número de carné 354, he revisado el proyecto de graduación de titulado Transporte óseo actualización de conceptos y evidencia científica actual el cual se presenta para optar por el grado de Especialista en Ortopedia y Traumatología.

He revisado la gramática, puntuación, ortografía y estructuras idiomáticas del documento escrito y he verificado que los mismos fueran corregidos por la autora.

Atentamente,



Guadalupe Vargas Díaz
Filóloga española
Céd. 1-1543-0013
ACFI
L 354



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Jeriko Gentle Tenoa, con cédula de identidad 702000961, en mi condición de autor del TFG titulado Transporte óseo: conceptos y evidencia científica actual

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Jeriko Gentle Tenoa

Número de Carné: A77730 Número de cédula: 702000961

Correo Electrónico: jerikogentle@gmail.com

Fecha: 14/7/2021 Número de teléfono: 83082389

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Fabrizio Arguedas Monge


FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Tabla de contenido

Dedicatoria	II
Agradecimientos.....	III
Resumen	IX
Summary	X
Lista de cuadros	XI
Lista de tablas	XI
Lista de figuras	XII
Lista de abreviaturas	XIII
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
Metodología.....	3
Marco teórico.....	4
Anatomía del hueso	4
Células óseas	5
Osteocitos.....	5
Osteoclastos.....	6
Osteoblastos.....	7
Composición no celular del tejido óseo	8
Mineralización ósea	9
Crecimiento, remodelado y reabsorción ósea	11
Ley de Wolff.....	12
Reseña histórica del transporte óseo	12

Indicaciones del transporte óseo	13
Ventajas del uso de transporte óseo	17
Inconvenientes y desventajas del transporte óseo	17
Requerimientos especiales del paciente sometido a transporte óseo	18
Principios biológicos biomecánicos del transporte óseo.....	19
Técnica quirúrgica del transporte óseo.....	21
Tipos de distracción ósea	24
Tipos de transporte óseo	26
I. Técnicas de distracción en el transporte óseo	26
II. Técnicas de fijación en el transporte óseo	27
Seguimiento de los casos	31
Complicaciones del transporte óseo.....	31
Recomendaciones para mejorar los resultados del transporte óseo	33
Evidencia científica actual de los resultados del transporte óseo.....	34
Discusión.....	38
Conclusiones.....	41
Referencias bibliográficas	43

Resumen

El transporte óseo es una técnica quirúrgica utilizada en el manejo de defectos óseos segmentarios de gran tamaño. Dicha técnica fue diseñada y promovida por Gavriil Abramovich Ilizarov, basándose en el principio de que el hueso responde a las fuerzas de tensión y compresión, y este es capaz de regenerarse o bien, producir hueso nuevo en respuesta a dichas fuerzas mecánicas. De la misma forma, dichas fuerzas favorecen el crecimiento longitudinal del tejido cutáneo, nervioso y vascular.

La técnica consiste en la movilización progresiva y controlada de un segmento libre de hueso vitalizado, el cual a su vez permite la osificación en la zona del defecto óseo segmentario, y la formación concomitante del tejido blando necesario para el soporte neurovascular y cobertura cutánea del mismo. El transporte óseo se lleva a cabo mediante el uso de corticotomías u osteotomía, la migración del fragmento seccionado y la fijación de los fragmentos mediante fijadores externos aislados o combinados con técnicas de fijación interna. La distracción ósea puede llevarse a cabo de manera unifocal, bifocal o trifocal.

El transporte óseo tiene como ventajas el permitir el tratamiento concomitante de defectos cutáneos e infecciones óseas, la preservación de la longitud de las extremidades y la corrección o prevención de defectos angulares. Lamentablemente su alto costo económico, el tiempo prolongado de tratamiento y sus resultados inciertos, suelen limitar su uso.

Las complicaciones más comunes del transporte óseo incluyen la infección del trayecto de las agujas, la no unión en el sitio de acoplamiento, la fractura del hueso transportado, el cierre prematuro o retraso del cierre de las osteotomías, los defectos angulares, las lesiones vasculares y nerviosas, entre otras.

La evidencia científica actual se muestra a favor del uso del transporte óseo para el manejo de defectos segmentarios óseos de gran tamaño, encontrando superioridad en cuanto a resultados radiográficos y clínicos, con tasas de complicaciones menores que las descritas en técnicas como el injerto vascularizado.

Summary

Bone transport is a surgical technique used in the management of large segmental bone defects. This technique was designed and promoted by Ilizarov, based on the principle that bone responds to tension and compression forces, and that bone is capable of regenerating or producing new bone in response to these mechanical forces. In the same way, these forces favor the longitudinal growth of cutaneous, nervous and vascular tissue.

The technique consists of the progressive and controlled mobilization of a free segment of vitalized bone, which in turn allows ossification in the area of the segmental bone defect, and the concomitant formation of the soft tissue necessary for neurovascular support and skin coverage thereof. Bone transport is accomplished through the use of corticotomies or osteotomy, migration of the sectioned fragment, and fixation of the fragments using isolated external fixators or combined with internal fixation techniques. Bone distraction can be carried out in a unifocal, bifocal, or trifocal manner.

Bone transport has the advantages of allowing concomitant treatment of skin defects and bone infections, preservation of limb length, and correction or prevention of angular defects. Unfortunately, its high economic cost, long treatment time, and uncertain results often limit its use.

The most common complications of bone transport include infection of the needle path, nonunion at the docking site, fracture of the transported bone, premature closure or delayed closure of osteotomies, angle defects, vascular and nervous lesions, among others.

Current scientific evidence is in favor of the use of bone transport for the management of large segmental bone defects, finding superiority in terms of radiographic and clinical results, with lower complication rates than those described in techniques such as vascularized grafting.

Lista de cuadros

Cuadro 1. Manejo del defecto óseo según el tamaño del defecto	14
---	----

Lista de tablas

Tabla 1. Opciones terapéuticas para el manejo de defectos óseos.....	16
--	----

Tabla 2. Resultados radiológicos y funcionales usando el sistema de la Asociación del estudio y la aplicación de los métodos de Ilizarov.....	35
---	----

Lista de figuras

Figura 1. Partes del hueso largo, estructura del hueso trabecular y cortical; tipos de células óseas.....	5
Figura 2. Osteoclastos multinucleados en las zonas de reabsorción ósea conocidas como Lagunas de Howship.....	7
Figura 3. Osteoblastos en áreas de mineralización ósea secretando colágeno tipo I para la mineralización del hueso nuevo.....	8
Figura 4. Esquema del injerto óseo vascularizado.	15
Figura 5. Manejo del espacio muerto en el defecto segmentario con perlas de antibiótico.....	21
Figura 6. Esquemización del transporte óseo.	23
Figura 7. Tipos de distracción ósea	26
Figura 8. Esquema ilustrativo de un transporte óseo trifocal.....	25
Figura 9. Radiografía que muestra transporte óseo segmentario en tibia con no unión secundaria a infección ósea	27
Figura 10. Esquema de transporte óseo externo utilizando un fijador externo monolateral	28
Figura 11. Esquema de transporte óseo interno utilizando un fijador externo circular.....	29
Figura 12. Esquema de transporte óseo interno-externo (combinado) utilizando un fijador externo circular	30

Lista de abreviaturas

DMP	Proteína de la matriz de dentina
M-CSF	Factor estimulante de colonias de macrófagos
MEPE	Fosfoglicoproteína extracelular de la matriz
NO	Óxido nítrico
OPG	Osteoprotegerina
PTH	Hormona paratiroidea
RANK	Receptor Activator of Nuclear Factor κ B
RANK-L	Receptor del ligando del factor nuclear kappa-B
RMN	Resonancia Magnética Nuclear
SIBLING	Glucoproteína N-glicosiladas con ligandos de unión de integrina
TGF- β	Factor de crecimiento transformante beta

Introducción

Históricamente, el tratamiento para la mayoría de los defectos óseos segmentarios fue la amputación (Fletcher C, 2007) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

La amputación temprana en pacientes con defectos óseos grandes suele ser una opción de tratamiento más rápida y satisfactoria para los pacientes, que los múltiples intentos de reconstrucción ósea. Es importante individualizar cada caso y considerar los factores propios de cada paciente como la edad, el estado del sistema inmunológico, la capacidad de cicatrización de heridas y la condición médica general. La amputación debe discutirse con todos los pacientes con defectos óseos tanto como un tratamiento inicial, como el tratamiento definitivo en caso de falla de otros métodos terapéuticos. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Actualmente, con el alto índice de traumas de alta energía (asociados al uso de vehículos automotores, deportes extremos y conflictos bélicos), los tumores óseos, las patologías óseas crónicas como la osteomielitis, así como la mejoría en el manejo de complicaciones no ortopédicas asociadas dichas lesiones (lo cual aumenta la sobrevida de los pacientes), las lesiones óseas, especialmente las de diáfisis de huesos largos, han aumentado en severidad y frecuencia, por lo cual, ha sido necesario optimizar el tratamiento de las mismas, y encontrar nuevas formas de tratar los defectos óseos de gran tamaño, especialmente aquellas que conllevan extensas lesiones de tejidos blandos. Una de esas técnicas, es la propuesta y desarrollada por Ilizarov, conocida actualmente como transporte óseo (Rigal S et al, 2012) (Demir B et al, 2008)

El transporte óseo consiste en la movilización progresiva de un segmento libre de hueso vivo, de forma longitudinal a través de la pérdida de sustancia ósea, mientras se va produciendo una osificación espontánea, progresiva, y de excelente calidad biológica en la zona de distracción (Veloz F et al) (Tetsworth K, 2018)

Se refiere a mover un segmento libre de hueso vivo para rellenar un defecto óseo con hueso viable. Además, se caracteriza por la translocación gradual de un segmento de hueso, a menudo junto con su envoltura de tejido blando circundante, desde un área sana adyacente hasta la región de pérdida ósea (Miraj F, 2018).

Es importante aclarar la diferencia del transporte óseo con respecto al acortamiento agudo, el cual es definido como la utilización de un fijador externo, como método de fijación y sostén de un hueso largo, el cual presenta un defecto óseo, sobre el cual se aplica compresión a través de dicho defecto para la lograr la unión, cuya longitud se restaura gradualmente mediante distracción simultánea a través de una osteotomía a otro nivel (Fletcher C, 2007).

El sello distintivo del alargamiento/acortamiento agudo es el contacto temprano a lo largo del área original de pérdida ósea (Kusnezov N et al, 2015) (Tetsworth K, 2018)

Objetivos

Objetivo General

Describir las generalidades conceptuales, clínicas y quirúrgicas del transporte óseo como técnica quirúrgica, así como su evidencia científica actual.

Objetivos específicos

Conocer las generalidades conceptuales del transporte óseo.

Describir los principios biomecánicos que fundamentan el uso del transporte óseo en la actualidad.

Conocer las indicaciones, ventajas y desventajas del transporte óseo en la actualidad.

Conocer las complicaciones del transporte óseo en la actualidad.

Conocer la evidencia científica actual que respalda el uso del transporte óseo como técnica quirúrgica en la actualidad.

Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica, mediante la revisión de artículos científicos de revisión, reportes de casos, reportes de series de casos y meta-análisis, relacionados con los defectos óseos segmentarios, el metabolismo óseo, las técnicas de reconstrucción de huesos largos y el transporte óseo, utilizando la base de datos de Google Scholar, Pubmed y Cochrane, utilizando aquellos que cuyo texto completo se encontrara en línea o contaran con una versión en pdf.

Como palabras clave se utilizaron transporte óseo, osteogénesis por distracción, defectos segmentarios óseos, metabolismo del hueso, reconstrucción de defectos óseos segmentarios.

Marco teórico

Anatomía del hueso

Los huesos son órganos del cuerpo humano, y estructuras metabólicas activas, que permiten el soporte estructural, la locomoción mediante palancas de movimiento, la protección de órganos vitales y el mantenimiento de la homeostasis mineral y el equilibrio ácido-base (Clarke B, 2008)

Los huesos largos, sujetos de esta revisión, están compuestos por un eje hueco o diáfisis, dos metáfisis en forma de cono, acampanadas, ubicadas debajo de las placas de crecimiento y dos epífisis redondeadas por encima de las placas de crecimiento. La diáfisis está compuesta mayoritariamente por hueso cortical, mientras que el hueso trabecular prevalece en las epífisis y metáfisis. (Clarke B, 2008)

El hueso cortical es denso y sólido, rodea el espacio medular del hueso largo. Por su parte, el hueso trabecular se asemeja a un panal de abejas, al estar compuesto por una red de placas y varillas trabeculares intercaladas en el compartimento de la médula ósea (Clarke B, 2008).

Ambos tipos de hueso, el trabecular y el cortical están formados por osteonas. En el hueso cortical, las osteonas se denominan sistemas de Havers, los cuales tienen una forma cilíndrica de 400mm de largo por 200mm de ancho en su base. El hueso cortical es metabólicamente menos activo que el hueso trabecular (Clarke B, 2008).

En el hueso trabecular, las osteonas se denominan paquetes. El hueso cortical posee una superficie perióstica, la cual es externa, y una superficie endóstica interna. El periostio es fundamental para el crecimiento óseo por aposición y para la reparación de fracturas. (Clarke B, 2008)

El periostio es una vaina de tejido conectivo fibroso que rodea la superficie cortical externa del hueso (excepto en las articulaciones), que contiene vasos sanguíneos, fibras nerviosas, osteoblastos y osteoclastos. Las fibras de Sharpey unen fuertemente el periostio a la superficie cortical externa (Clarke B, 2008)

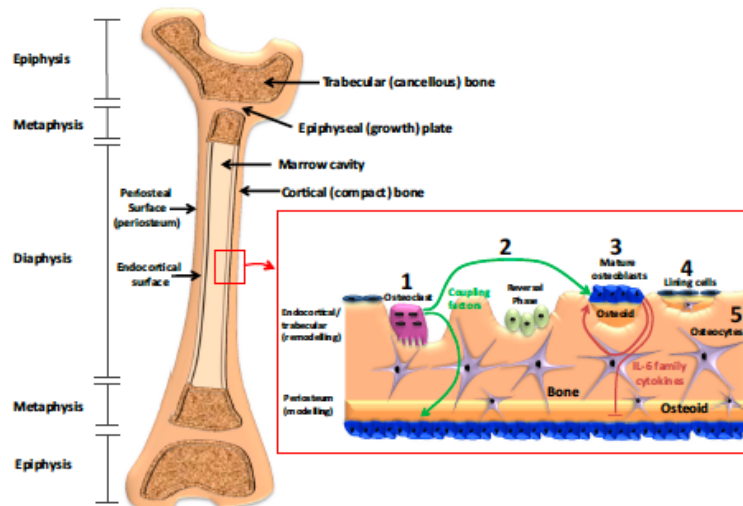


Figura 1. Partes del hueso largo, estructura del hueso trabecular y cortical; tipos de células óseas.

Epiphysis: epífisis; metaphysis: metáfisis; diaphysis: diáfisis; endocortical surface: superficie endocortical, periosteal Surface (periosteum): superficie perióstica (periosteo); marrow cavity: cavidad medular; cortical (compact) bone: hueso cortical (compacto) ephyseal growth plate: placa de crecimiento epifisiaria; trabecular (cancellous) bone: hueso trabecular; osteoclast: osteoclasto; coupling factor: factor acomplante; reversal phase: fase de inversión; mature osteoblasts: osteoblasto maduro; osteoid: osteoide; bone: hueso; lining cell: célula de recubrimiento, osteocytes: osteocitos; IL-6 family cytokines: citoquinas de la familia IL-6; endocortical/trabecular (remodeling): endocortical/trabecular (remodelación); periosteum (modelling): periostio (modelamiento).

Tomado de N.A. Sims, C. Vrahnas / Archives of Biochemistry and Biophysics xxx (2014)

Células óseas

Las células que forman el hueso incluyen los osteoblastos, los osteoclastos y osteocitos (Fonseca H et al, 2013) (Natalie A. Sims, Christina Vrahnas, 2014)

Osteocitos

Los osteocitos representan la mayoría de células del tejido óseo y son primordiales en el metabolismo y remodelado óseo. Los osteocitos representan osteoblastos diferenciados terminalmente y funcionan

dentro de redes sincitiales para apoyar la estructura y el metabolismo óseos. Se ubican dentro de las lagunas de hueso mineralizado y se conectan con los canalículos de hueso mineralizados por medio de procesos filipodiales (Clarke B, 2008) (Fonseca H et al, 2013)

Los osteocitos expresan osteocalcina, galectina 3 y el CD44 (este es un receptor de adhesión celular para varias proteínas de la matriz ósea). Estas y otras proteínas apoyan la adhesión intercelular y regulan el intercambio mineral en el líquido de las lagunas óseas y la red de canalículos óseos. Los osteocitos no secretan fosfatasa alcalina (Clarke B, 2008)

Al igual que los osteoblastos, los osteocitos poseen la capacidad de mecano sensación. Debido a esta propiedad, son capaces de convertir las señales de estrés en flexión o el estiramiento en señales de actividad biológicas. Los mecanismos de señalización implicados en la mecanotransducción incluyen la detección de cambios en los flujos de líquido intersticial, así como la secreción de moléculas de señalización como la prostaglandina E2, ciclo-oxigenasa 2, varias quinasas, Runx2 y Óxido nítrico. (Clarke B, 2008) (Fonseca H et al, 2013)

La carga mecánica sobre los osteocitos favorece la expresión de la fosfoglicoproteína extracelular de la matriz (MEPE), un regulador a la baja de la formación de hueso, mientras que regula a la alza a la proteína de la matriz de dentina (DMP) -1, favoreciendo la mineralización ósea. Por otra parte, la estimulación mecánica favorece la liberación de óxido nítrico (NO) y la esclerotina, lo cual favorece la estimulación ósea. Las proteínas de la familia SIBLING (glucoproteína N-glucosiladas con ligandos de unión de integrina, por sus siglas en inglés) aumentan su expresión al someter los osteocitos a cargas mecánicas, y su efecto final es el aumento de la mineralización ósea (Fonseca H et al, 2013)

Además de participar en la formación de hueso, los osteocitos participan en la osteólisis al actuar como células fagocíticas mediante el uso de sus lisosomas. (Clarke B, 2008)

Los osteocitos pueden entrar en apoptosis como respuesta a una deficiencia de estrógenos, o tratamientos como los glucocorticoides. (Clarke B, 2008)

Osteoclastos

Los osteoclastos son las células óseas encargadas de la reabsorción ósea. Son células derivadas de células precursoras multinucleadas de la familia de los monocitos-macrófagos de la médula ósea, su linaje es hematopoyético. El Ligando del Receptor Activador del factor nuclear kapa beta (RANKL, por

sus siglas en inglés) y factor estimulante de macrófagos (M-CSF, por sus siglas en inglés) son dos citoquinas fundamentales para la formación de los osteoclastos, y ambas son producidas por los osteoblastos, otro tipo de células encontradas en el tejido óseo. El RANKL es indispensable para la formación de osteoclastos, mientras que el M-CSF permite su proliferación, supervivencia y diferenciación, críticos para el proceso de reabsorción ósea. (Clarke B, 2008) (Natalie A. Sims, Christina Vrahnas, 2014)

Los osteoclastos son susceptibles a señales endocrinas y paracrinas; la disminución del factor de crecimiento transformante beta (TGF- β), el aumento del activador del receptor del ligando del factor nuclear kappa-B (RANK-L) y del factor estimulante de colonias de macrófagos (M-CSF), favorecen la activación de los osteoclastos (Clarke B, 2008).

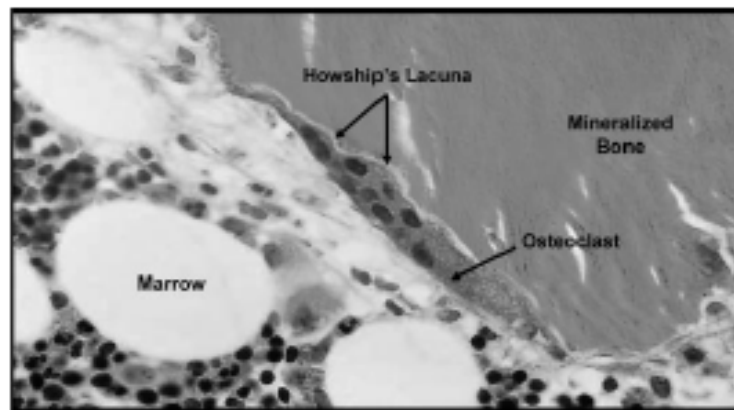


Figura 2. Osteoclastos multinucleados en las zonas de reabsorción ósea conocidas como Lagunas de Howship. Marrow: médula ósea. Howship' lacuna: Laguna de Howship; mineralized bone: hueso mineralizado. Osteoclast: osteoclasto. Tomado de: (Clarke B, 2008)

Osteoblastos

Los osteoblastos también se derivan de las células osteoprogenitoras. Las células osteoprogenitoras se diferencian en preosteoblastos, los cuales cambian su forma fusiforme a una forma cuboidal y se convierten en osteoblastos. Su principal acción es la síntesis de la matriz ósea en las superficies formadoras de hueso. Los osteoblastos preosteoblastos secretan fosfatasa alcalina. Los osteoblastos maduros y activan sintetizan la matriz ósea al producir colágeno tipo I y otras sustancias de la matriz ósea (Clarke B, 2008)

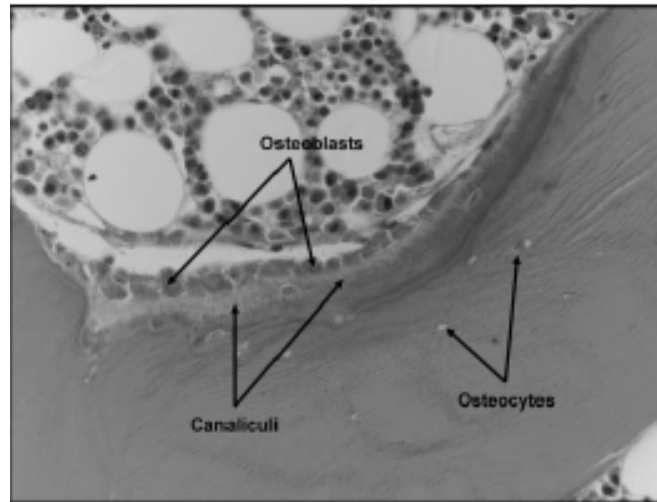


Figura 3. Osteoblastos en áreas de mineralización ósea secretando colágeno tipo I para la mineralización del hueso nuevo. Tomado de: (Clarke B, 2008)

Composición no celular del tejido óseo

El hueso es una estructura viva, compuesta en un 50 a 70% por minerales, de un 20 a 40% de matriz orgánica, 5 a 10% de agua y 3% de lípidos. La matriz ósea está formada predominantemente por colágeno tipo I (85 al 90%), colágeno tipo III y V, otros tipos de colágeno con triple hélice interrumpida (IX, XII, XIX, XX, XXI), así como otras proteínas no colágenas y proteoglicanos, que representan entre el 10 y 15% de la proteína ósea total. En las proteínas de la matriz ósea se unen los cristales de hidroxiapatita mediante el proceso de biomineralización (Fonseca H et al, 2013) (Clarke B, 2008)

Los osteoblastos secretan la mayoría de proteínas colágenas y no colágenas de la matriz ósea. El colágeno tipo I es depositado por los osteoblastos durante el proceso de osteogénesis. La formación de colágeno inicia con la síntesis de el procolágeno, su precursor, el cual está formado por tres cadenas polipeptídicas en una triple hélice, las cuales sufren modificaciones postraduccionales y enlaces disulfuro que las estabilizan entre si. Posteriormente el procolágeno sufre escisiones en sus enlaces carbono terminal y nitrógeno terminal, permitiendo diversos enlaces cruzados intermoleculares e interfibrilares que dan como resultado la molécula de colágeno (Fonseca H et al, 2013).

Entre las proteínas no colágenas se destacan por su relevancia la osteocalcina, la fosfatasa alcalina y la osteonectina. La osteocalcina normalmente inhibe la formación de hueso. Al secretada tanto por

osteoblastos como osteoclastos, se considera un marcador de recambio celular. La fosfatasa alcalina es la principal proteína glicosilada de la matriz ósea. Se une a la superficie de los osteoblastos y su papel en la mineralización ósea no está completamente claro. La osteonectina representa el 2% de las proteínas del hueso, afecta el crecimiento y la proliferación de osteoblastos consecuentemente la mineralización ósea. (Clarke B, 2008)

Los cristales de hidroxiapatita $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$, constituyen el principal contenido mineral del hueso, suelen ser cristales muy pequeños y heterogéneos en el hueso sano. (Clarke B, 2008)

La fase mineral ósea es la principal responsable de la resistencia a la deformación o rigidez, mientras que las fibras de colágeno permiten la absorción de cargas cíclicas y la adaptación a las mismas. Esta naturaleza bifásica le permite absorber tensiones por deformidad elástica, al mismo tiempo que tolera cargas elevadas antes de fracturarse. (Fonseca H et al, 2013).

Mineralización ósea

La matriz inorgánica del hueso es crucial para la resistencia y rigidez ósea. La mineralización ósea es un proceso asociado a la expresión de proteínas como la fosfatasa alcalina, osteocalcina, osteopontina y sialoproteína ósea. Dichas proteínas se unen al calcio y al fosfato, y favorecen y regulan su depósito de forma ordenada en cristales de hidroxiapatita. (Clarke B, 2008)

Durante la osteogénesis, los osteoblastos secretan la matriz ósea inorgánica, la cual funciona como andamio para la posterior formación de plantillas cubiertas de minerales, constituyendo esta etapa la mineralización primaria (Fonseca H et al, 2013).

El hueso nuevo luego experimenta progresivamente una mineralización adicional (mineralización secundaria), debido a un aumento gradual en el número y tamaño de los cristales minerales. Si el recambio óseo es demasiado alto, la mineralización secundaria no se produce de manera eficiente, ya que este proceso lento no tiene tiempo suficiente para terminar antes de que una nueva unidad de remodelación reabsorba el hueso nuevo nuevamente, lo que lleva a una disminución de la mineralización ósea general y, en consecuencia, a una disminución en rigidez ósea (Fonseca H et al, 2013).

La mineralización ósea debe obedecer al balance de formación y reabsorción ósea. Un exceso de mineralización puede comprometer la fuerza del hueso. Una tasa de mineralización disminuida produce una disminución en el recambio óseo, ocasionando huesos viejos con exceso de mineralización, el cual es menos resistente a la carga cíclica debido a la formación de microgrietas que conllevan a fracturas. Además, el recambio óseo y la mineralización disminuida, aumenta el porcentaje de hueso viejo y con daño estructural, lo que conlleva a fracturas y dificultad para la consolidación de las mismas (Fonseca H et al, 2013)

Aunado a la frecuencia de la mineralización ósea, la forma y tamaño de los cristales de hidroxiapatita parecen influir en la resistencia ósea, siendo esta mejor en presencia de cristales heterogéneos, los cuales se encuentran predominantemente en el hueso joven. La hormona paratiroidea (PTH) aumenta el recambio óseo y favorece la heterogeneidad de los cristales de hidroxiapatita, esto mediante la eliminación del hueso viejo (con cristales de hidroxiapatita más grandes) y su reemplazo por hueso nuevo (con cristales de hidroxiapatita más pequeños) (Clarke B, 2008)

La fosfatasa alcalina puede aumentar los niveles locales de fósforo, eliminar los inhibidores del crecimiento de los cristales de hidroxiapatita y controlar los nucleadores de la mineralización como las fosfoproteínas (Clarke B, 2008)

Por otra parte, la vitamina D es un cofactor crucial en la mineralización de la matriz ósea al estimular dicho proceso. La vitamina D biológicamente activa procura que los niveles de calcio y fósforos séricos se mantengan normales para permitir el depósito de dichos minerales en el hueso. La vitamina D además de favorecer la absorción de calcio y fósforo intestinal, también promueve la diferenciación de osteoblastos y favorece que estos expresen fosfatasa alcalina específica de hueso, osteocalcina, osteonectina, osteoproteína (OPG). Además, la vitamina D en suero influye en la apoptosis de otras células esqueléticas, como los condrocitos hipertróficos (Clarke B, 2008)

Crecimiento, remodelado y reabsorción ósea

A lo largo de la vida, el hueso experimenta un crecimiento, modelado y remodelado tanto longitudinal como radial. El crecimiento longitudinal ocurre principalmente en las placas de crecimiento, mediante la proliferación del cartílago epifisiario y metafisiario. El crecimiento radial y el cambio del eje se da mediante la aposición perióstica de hueso nuevo (Clarke B, 2008)

La remodelación ósea permite la renovación del hueso, con el fin de mantener la resistencia ósea y la homeostasis mineral; implica la eliminación constante de hueso viejo y el consecuente reemplazo por hueso nuevo. Este proceso evita que se acumule el hueso con microdaños (Clarke B, 2008)

La remodelación ósea se lleva a cabo mediante cuatro fases: activación, reabsorción, inversión y formación ósea. La activación requiere el reclutamiento y activación de precursores de osteoclastos y macrófagos, la elevación del endostio que contiene células precursoras y la fusión de células mononucleares que forman los preosteoclastos multinucleados. Dichos osteoclastos, al unirse a la matriz ósea por medio de receptores de integrinas, forman una zona de sello anular debajo de los osteoclastos, donde ocurre la reabsorción ósea. Este proceso tarda entre 2 y 4 semanas. (Clarke B, 2008)

La reabsorción ósea es un proceso llevado a cabo por los osteoclastos. Los osteoclastos secretan fosfatasa ácida resistente a tartrato, catepsina K, y otras moléculas que favorecen la secreción de iones de hidrógeno que acidifican el medio donde ocurre la reabsorción, lo que da como resultado la formación de las lagunas de Howship (Clarke B, 2008).

La inversión ósea corresponde al proceso mediante el cual cesa la reabsorción ósea e inicia la formación ósea por acción de los preosteoblastos y osteocitos, la cual es mediada por los factores de crecimiento (Clarke B, 2008).

La formación ósea tarda de 4 a 6 semanas y es mediada por los osteoblastos que sintetizan nueva matriz orgánica de colágeno y regula la mineralización de la nueva matriz ósea, mediante la liberación de vesículas que contienen calcio, fosforo, y además destruyen a los inhibidores de los mineralización como el pirofosfato y los proteoglicanos. Alrededor del 30% de los osteoblastos maduros y rodeados de matriz ósea mineralizada se convierten en osteocitos o células de revestimiento, mientras que entre el 50 y el 70% de los osteoblastos sufren apoptosis. Las células de revestimiento pueden regular la

entrada y salida de iones y retienen la capacidad de rediferenciarse en osteoblastos al ser estimulados por la hormona paratiroidea (PTH) o fuerzas mecánicas. Cada ciclo de remodelación ósea produce una osteona nueva (Clarke B, 2008)

Ley de Wolff

La ley de Wolff establece que el hueso se remodela para adaptarse a las tensiones que se les imponen. El remodelado óseo puede llevarse a cabo desde dos perspectivas diferentes. La primera perspectiva trata al hueso como un solo tejido, y su formación y reabsorción es sincrónica en todos los hueso del cuerpo humano. Por otra parte, la perspectiva de hueso como órgano responde a las desviaciones individuales para cada hueso en su formación y reabsorción, y está en íntima relación con las cargas mecánicas a las que está siendo sometido y al daño que le pueda ocurrir (Natalie A. Sims, Christina Vrahnas, 2014) (Frost H, 2004)

Las cargas mecánicas desencadenan señales que son detectadas por las células óseas y desencadenan respuestas paracrinas y endocrinas que afecta la formación o reabsorción ósea, las cuales son predeterminadas por los umbrales genéticos para la activación de dichas señales (Frost H, 2004).

Las características genéticas del hueso, la carga cíclica sobre el hueso y el daño producido al mismo forman el mecanostato del hueso. Las funciones del mecanostato incluyen hacer el hueso lo suficientemente fuerte para evitar las fracturas, y adaptar el hueso a las cargas a las que es sometido.

La ley de Wolff fue descrita por Julius Wolff, quien a su vez se baso en los principios de von Meyer y Karl Culman, Von Meyer describió la dirección de las líneas trabeculares del fémur, y Culman describió que dichas líneas se reorientan producto de traumas o cambios en las cargas mecánicas del fémur.

Reseña histórica del transporte óseo

Los primeros estudios relacionados con el transporte óseo se le atribuyen a Gavriil Abramóvich Ilizarov, considerado actualmente el padre de la fijación externa y la reconstrucción ósea en ortopedia. Ilizarov, en 1951, en Kurgán, región de Siberia Central, utiliza un fijador externo anular con agujas de

1,5 a 1,8mm, en cruz, transfixiantes, además de incorporar agujas con tuercas sobre anillos o semianillos planos. (Veloz F et al) (Aronson J, 1997)

Más adelante, en 1954, describe el “Nuevo principio de la osteosíntesis con el aparato de agujas en cruz” y en 1960 demostró “la regeneración de los huesos tubulares largos” por el método de compresión-distracción con su fijador externo, el cual, según explica en sus publicaciones, permite no sólo la distracción ósea, si no que incluye la distracción de arterias y nervios. Posteriormente, en 1978, Wagner incorpora la técnica del fijador externo monoplanar, con clavos no transfixiantes. Por otra parte, DeBastiani en 1986, realiza correcciones de defectos angulares, mediante el uso de un tutor externo (Veloz F et al). (Rigal S et al, 2012) (Tetsworth K, 2018) (Millonig F, 2021)

Indicaciones del transporte óseo

La principal indicación para el uso del transporte óseo como técnica quirúrgica es la pérdida de un segmento óseo, o bien, la necesidad de generar hueso nuevo en un hueso largo. Paley definió un defecto óseo segmentario como mayor de 1 cm, aunque estos suelen ser mayores en tamaño (Millonig F, 2021).

Las indicaciones de transporte óseo incluyen acortamiento congénito de la extremidad, desviaciones angulares y defectos óseos segmentarios secundarios a neoplasia, trauma, infecciones óseas, fractura con consolidación viciosa, no uniones, defectos metafisiarios y epifisiarios en niños, artrodesis, el aumento del soporte óseo para el reemplazo total de tobillo, entre otros (Khaleel A et al, 2001) (Millonig F, 2021)

La pérdida de un segmento de un hueso largo es la indicación más común para el uso de transporte óseo, dichas pérdidas pueden ser agudas secundarias a trauma o infección, o pueden ser crónicas. Las opciones terapéuticas en las pérdidas agudas segmentarias de hueso incluyen múltiples injertos de hueso esponjoso con procedimientos de tejido blando asociados, reconstrucciones mediante transferencia de tejido óseo y blando vascularizado libre y el transporte óseo. El tipo de tratamiento elegido dependerá en gran parte del tamaño del defecto óseo. (Khaleel A et al, 2001) (Yushan M et al, 2020). (Li R et al, 2020)

Cuadro 1. manejo del defecto óseo según el tamaño del defecto

Tamaño del defecto (cm)	Primera línea de tratamiento
0.1-1	Acortamiento agudo
0,5-3	Injerto de hueso esponjoso
2-10	Transporte óseo
5-12	Injerto óseo libre vascularizado
10-30	Amputación

Tomado de: DeCoster, Thomas A. MD; Gehlert, Rick J. MD; Mikola, Elizabeth A. MD; Pirela-Cruz, Miguel A. MD Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: January 2004 - Volume 12 - Issue 1 - p 28-38

En aquellos pacientes con defectos óseos menores a 3cm, se recomienda el uso de injerto óseo y quienes presentan defectos mayores a 12cm no se consideran candidatos a un transporte óseo ya que la extremidad se considera inviable. (Ugalde C et al, 2012) (Li R et al, 2020).

El injerto de hueso esponjoso ha sido considerado la principal alternativa a la amputación. Es una técnica aceptada y sumamente utilizada para el tratamiento quirúrgico de los defectos esqueléticos. Sin embargo, presenta diferentes inconvenientes tales como la cantidad limitada de sitios donantes, un límite de cantidad de hueso esponjoso disponible para el injerto, y las molestias Y/o morbilidad de las zonas donantes. Ante estas dificultades, el transporte óseo utilizando la técnica descrita por Ilizarov representa una alternativa para el tratamiento de los defectos óseos segmentarios, o bien, un complemento para el injerto óseo (Rose RE, 2002) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

El injerto óseo vascularizado es una técnica que se ha utilizado en defectos óseos de 5 a 12 cm, como una alternativa al transporte óseo. Se considera una técnica de microcirugía en la cual se realiza el aislamiento de un segmento del peroné contralateral con arterias y venas nutritivas adheridas. Este segmento se transfiere al defecto tibial y la fijación esquelética va seguida de anastomosis vasculares. Se requiere que el injerto supere en al menos 4cm el tamaño del defecto para contrarrestar la superposición de los fragmentos proximales y distales. El tiempo medio de consolidación es de 3 a 6 meses. En la reconstrucción postraumática, esta técnica tiene una tasa de consolidación de hasta el 90%. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Entre las desventajas del injerto óseo no vascularizado, se describe que la hipertrofia del hueso no suele ser confiable y comúnmente asocian fracturas tardías. Ninguno sustituto óseo adicionado al injerto óseo ha demostrado eficacia clínica suficiente para prevenir este tipo de lesiones, por lo que se considera riesgoso utilizar injertos óseos en defectos óseos mayores a 5cm. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

El injerto óseo vascularizado mejora la vascularidad, reduce el dolor neurogénico, permite el cierre primario de las heridas. Por otra parte, se asocia edema excesivo y redundancia de tejidos blandos. Este tratamiento suele ser mejor tolerado en las extremidades superiores, cuya función se ve levemente afectada por la longitud de la misma, caso contrario a las extremidades inferiores; también es mejor tolerada en los segmentos superiores de las extremidades, es decir, en humero y fémur con respecto al antebrazo y la tibia. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

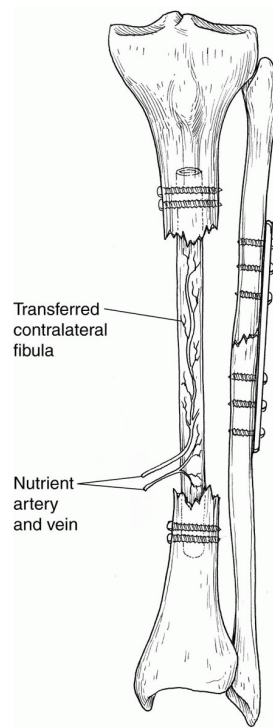


Figura 4. Esquema del injerto óseo vascularizado. Transferred contralateral fibula: fibula contralateral transferida. Nutrient artery and vein: arteria y vena nutricia. Tomado de: DeCoster, Thomas A. MD; Gehlert, Rick J. MD; Mikola, Elizabeth A. MD; Pirela-Cruz, Miguel A. MD Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: January 2004 - Volume 12 - Issue 1 - p 28-38

El manejo quirúrgico de la pérdida segmentaria mayor a 4cm representa un reto para la ortopedia actual. Se han descrito numerosos procedimientos quirúrgicos para la reconstitución de la masa ósea, para alcanzar la consolidación de la fractura y lograr una extremidad funcional y biomecánicamente estable. Las pérdidas óseas mayores a 4cm y menores de 12cm suelen ser indicación de transporte óseo, esto porque permite evitar o corregir el acortamiento de la extremidad o mantener la longitud de la extremidad (Watson T, 2006)

Tabla 1. Opciones terapéuticas para el manejo de defectos óseos

Tratamiento	Beneficios	Inconvenientes mayores
Amputación	Tiempo de tratamiento corto	Perdida total de la función de la extremidad
Acortamiento de extremidad	Tiempo de tratamiento corto Menores complicaciones	Pérdida parcial de la función de la extremidad
Injerto autólogo de hueso no vascularizado	Usado frecuentemente Resultados razonablemente exitosos	Consolidación lenta, no fidedigna Morbilidad del sitio donante Menos aplicable a defectos grandes
Transporte óseo con osteogénesis por distracción	Mejor calidad ósea al final del tratamiento Útil en defectos óseos grandes	Complicaciones frecuentes Tratamiento prolongado
Injerto libre vascularizado	Relleno del defecto con hueso vivo Útil en defectos grandes	Morbilidad del sitio donante Fractura Falta de hipertrofia
Translocación de fíbula ipsilateral	Extensión adecuada sobre el defecto óseo Limitada morbilidad den el sitio donante No requiere equipo especial	No siempre es posible No muy fuerte Pobre función muscular

Tomado de: DeCoster, Thomas A. MD; Gehlert, Rick J. MD; Mikola, Elizabeth A. MD; Pirela-Cruz, Miguel A. MD Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: January 2004 - Volume 12 - Issue 1 - p 28-38

Ventajas del uso de transporte óseo

El transporte óseo, como técnica de reconstrucción y reparación de defectos óseos diafisarios severos permite erradicar la infección, compensar defectos óseos y promover la unión ósea a través de la histogénesis ósea progresiva, al mismo tiempo que puede corregir las deformidades y la discrepancia en la longitud de las extremidades durante el transcurso del transporte óseo (Peng Y et al, 2015) (Li R et al, 2020). (Omer A et al, 2018)

Permite además reducir el tamaño del defecto de tejidos blandos, reducir la lesión de tejidos blandos en la cirugía, realizar el transporte en ambas direcciones, mantener o regenerar el ancho normal del hueso, y disminuir las cantidades de injerto óseo requeridos (Khaleel A et al, 2001) (Miraj F, 2018)

Inconvenientes y desventajas del transporte óseo

El proceso mediante el cual se lleva cabo con éxito un transporte requiere un nivel muy alto de compromiso por parte del paciente y del equipo médico, implica un tratamiento por tiempos prolongados (mayores a 6 meses). La larga duración del tratamiento impide que el paciente se dedique a sus actividades normales, provoca atrofia muscular por desuso, pérdida de ingresos económicos y estrés psicológico, así como problemas familiares y laborales. (Sigmund I et al, 2020) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Además, es altamente probable que se requieran procedimientos quirúrgicos adicionales y/o seriados (tales como injerto, resección, realineación de tornillos, retiro de fijador, y fijación definitiva) (Sigmund I et al, 2020).

Por otra parte, el transporte óseo, tiene poca evidencia científica en lesiones agudas y los huesos presentan una tendencia a la angulación sagital, aun con correcciones coronales buenas, luego de la extracción del fijador externo (Khaleel A et al, 2001) (Magadum M et al, 2006).

Los pacientes sometidos a procedimientos de distracción ósea, tales como el transporte óseo, pueden presentar dolor y contractura en las articulaciones (Liu Y et al, 2020) (Fletcher C, 2007).

El transporte óseo tiene como inconvenientes técnicos la complejidad de la colocación y manejo del dispositivo externo, el tiempo prolongado de su utilización, y la falta de unión de los segmentos de

acoplamiento y regeneración. Además, esta técnica quirúrgica suele tener un alto costo y una alta tasa de fracaso. (Khaleel A et al, 2001) (Watson T, 2006).

Requerimientos especiales del paciente sometido a transporte óseo

El tratamiento ideal requiere un material con una afinidad biológica adecuada, resistente a la infección, suficiente fuerza biomecánica y durabilidad (Khaleel A et al, 2001)

El éxito del transporte óseo requiere la presencia de segmentos bien vascularizados del hueso a transportar, y un tejido blando con adecuada vitalidad. La vascularidad ósea depende directamente de la irrigación proveniente del tejido blando circundante. Un tejido blando pobremente vascularizado evita que se desarrolle una regeneración adecuada del segmento óseo a transportar. La vascularidad adecuada favorece la migración de las células pluripotenciales y los factores biológicos responsables de la neoformación de hueso y de su remodelación. Un exceso de movilidad ósea traumatizan el suministro sanguíneo local, por esta razón, se requiere estabilidad mecánica en la zona de la pérdida ósea para la adecuada consolidación ósea. Por esta razón es imprescindible la resección del tejido necrótico y del tejido avascular antes de iniciar el transporte óseo. (Watson T, 2006)

Los pacientes con insuficiencia vascular o enfermedad de pequeños vasos (diabetes mellitus, enfermedad vascular grave, trastornos del tejido conectivo) suelen verse más beneficiados con el acortamiento agudo ya que no se recomienda la transferencia de un tejido vascularizado libre ya que no está realmente vascularizado (Watson T, 2006)

Los pacientes con defectos óseos segmentarios, principalmente aquellos con trauma severo asociado, requieren una evaluación exhaustiva que permita determinar si el un candidato ideal al transporte óseo. Se debe valorar la extensión de la lesión de los tejidos blandos y del tejido óseo, realizando mediciones que determinen la cantidad de cm de huesos perdidos, y cuanto de esto se desea regenerar (Watson T, 2006)

La RMN puede ser útil para determinar la extensión de la vascularidad de la médula ósea en un segmento de transporte propuesto o en el sitio donde se unirá el fragmento transportado. La arteriografía permite valorar la vascularización distal con respecto a la viabilidad del segmento óseo transportado, así como la irrigación de la cual dispone el tejido blando distal (Watson T, 2006)

La valoración inicial requiere considerar el tamaño del defecto del tejido blando, y si este se puede manejar con cobertura cutánea, terapia de vacío para el cierre de heridas, o si requerirá la rotación de colgajos o de injertos de piel. En casos de pérdida ósea aguda, se recomienda evitar los colgajos rotacionales locales porque el músculo rotado a menudo está involucrado en la zona aguda de la lesión; realizar una mioplastia rotacional puede dañar un músculo ya comprometido, y su vascularidad puede ser mínima e insuficiente. El uso de transferencia de tejido libre, ofrece un lecho de tejido bien vascularizado a través del cual puede ocurrir el transporte óseo, el acoplamiento y la curación final del sitio de unión del segmento transportado y el segmento óseo regenerado (Watson T, 2006).

Por otra parte, aquellos defectos óseos tanto agudos como crónicos, mayores a 4cm en tibia y humero, y mayores a 5cm en fémur, con defectos de tejidos blandos severos, responden mejor al uso de técnicas de transporte masivo como el transporte óseo. Un acortamiento agudo mayor a 4cm puede comprometer la vascularidad ocasionando un bajo flujo y disminuyendo la capacidad de regeneración ósea (Watson T, 2006).

Principios biológicos biomecánicos del transporte óseo

El principio biomecánico del transporte óseo fue investigado, descrito, promovido y desarrollado por Ilizarov. Dicho procedimiento está basado en el principio mecánico del efecto tensión-estrés. La osteotomía y la corticotomía estimulan la actividad proliferativa y metabólica de los tejidos tanto óseo como blandos. El colágeno se orienta en el plano de tensión. Se genera tejido óseo en la región proximal y distal al defecto segmentario. Tanto el colágeno tipo 1 como el 2, son producidos por los osteoblastos (Khaleel A et al, 2001) (Ugalde C et al, 2012)

La compresión y la distracción óseas son proporcionadas por una fijación externa dinámica que permite el soporte del peso en la extremidad inferior; distracción distal al lugar de la fractura, realizada tras la corticotomía en la zona metafisaria, manteniendo intactos el periostio y el endostio, transportando así un segmento óseo de 1 mm por día, en cuatro maniobras regularmente espaciadas durante 24h (Rigal S et al, 2012)

La mayoría del hueso nuevo se forma mediante osificación intramembranosa, aunque puede apreciarse osificación endocondral en el “docking site” o sitio de unión del hueso neoformado con el

segmento transportado. El hueso neoformado mantiene una orientación en relación a los haces de colágeno y se consolida en columnas paralelas a la distracción. (Khaleel A et al, 2001)

La distracción no solo favorece la osteogénesis, sino que permite la angiogénesis, inclusive hasta luego de los 4 meses posteriores a la corticotomía, alcanzando un aumento del flujo vascular de hasta 10 veces. También se favorece el crecimiento del tejido muscular, las fascias, tejido nervioso y la piel (Khaleel A et al, 2001)

El ácido ascórbico juega un papel importante en la neoformación ósea por distracción. Por sí mismo es suficiente para inducir la diferenciación osteoblástica. En un estudio realizado con células in vitro, se encontró que 30 a 90 µg/ml de ácido ascórbico era la concentración óptima para favorecer la osteogénesis, ya que el ácido ascórbico es capaz de activar la expresión de la osteopontina, la osteonectina (SPARC) y el ARN mensajero del factor de transcripción 2 relacionado con Runt (RUNX2). Por lo tanto, en dicho estudio se concluyó que el ácido ascórbico se puede utilizar como suplemento nutricional para la terapia celular de enfermedades relacionadas con los huesos. El ácido ascórbico también influye en la osteogénesis in vivo e in vitro al promover la expresión de genes implicados en la diferenciación de condrocitos, como la vía de señalización ERK (Aghajanian P et al, 2015). (Norhaiza S et al, 2014).

El ácido ascórbico en los osteoblastos estimula el depósito inicial de matriz extracelular de colágeno, mediante la inducción de genes específicos asociados con osteoblastos, como la fosfatasa alcalina, la osteocalcina, osteopontina, y la osteonectina (Aghajanian P et al, 2015) (Sarizoen E et al, 2002).

En los osteoclastos, el ácido ascórbico aumenta significativamente el número, el tamaño y la nucleación de osteoclastos en cultivos primarios de médula ósea de ratón. Es capaz de aumentar hasta 5 veces la expresión de RANK-L e inducir la formación de osteoclastos. Sin embargo, en etapas tardías, induce la apoptosis de los osteoclastos (Aghajanian P et al, 2015) (Hart A, 2015).

La vitamina D, también favorece la neoformación y remodelación ósea en los pacientes tratados con transportes óseos. La vitamina D se ingiere en la dieta (como colecalciferol) o se sintetiza en la piel; en el hígado se hidroxila a 25-vitD3 (calcifediol) y en el riñón sufre una nueva hidroxilación que la convierte en 1,25-VitD3 (calcitriol), la cual es su forma biológicamente activa. La vitamina D tiene en sus órganos diana receptores miembros de la familia de receptores de hormonas esteroideas/tiroideas,

por lo cual funciona como un factor de transcripción asociado a la Osteocalcina, osteopontina y el RANKL. En el sitio de fractura o corticotomía, hay un aumento de los receptores de vitamina D. (Fischer V et al, 2018) (Aghajanian P et al, 2016)

Técnica quirúrgica del transporte óseo

En las lesiones agudas con lesiones extensas de tejido blandos, el primer paso implica un lavado exhaustivo de las heridas y el debridamiento de los tejidos necróticos. Seguidamente, se procede a la colocación y estabilización del fijador externo monolateral. Se debe eliminar cualquier tejido blando y óseo desvitalizado o necrótico. Posteriormente se valora si el paciente es candidato al transporte óseo y si existen otras opciones terapéuticas con mayor beneficio para el paciente. Los lavados quirúrgicos se mantienen cada 48h hasta que la zona de lesión carezca de tejido necrótico y desvitalizado.

El manejo del espacio muerto de tejido blando y óseo, infectado o con alto riesgo de infección, puede tratarse con la administración de perlas de antibiótico, cuya concentración local de antibiótico suele ser mayor a la alcanzada con el antibiótico intravenoso. Las perlas ocupan un espacio muerto y evitan la acumulación de hematomas o tejido cicatricial que desencadenan o empeoran la infección. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)



Figura 5. Manejo del espacio muerto en el defecto segmentario con perlas de antibiótico. Antibiotic Beads in Bone defect: perlas de antibiótico en el defecto óseo. Tomado de: DeCoster, Thomas A. MD; Gehlert, Rick J. MD; Mikola, Elizabeth A. MD; Pirela-Cruz, Miguel A. MD Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: January 2004 - Volume 12 - Issue 1 - p 28-38

Una vez que se coloca el fijador externo, el cual debe alinear los fragmentos óseos en todos los planos, se busca preservar la integridad de los tejidos blandos, sea mediante injertos, colgajos o la colocación de terapia de cierre de herida asistida por vacío (VAC) (Ugalde C et al, 2012) (Omer A et al, 2018)

En pacientes con lesiones agudas estabilizadas, o en aquellos pacientes con defectos segmentarios de larga data, el siguiente objetivo es mantener la longitud de la extremidad. Para lograr este objetivo, es necesario realizar una corticotomía proximal o distal al sitio de escisión, con disrupción mínima de la médula ósea. Posteriormente, se realiza el alargamiento a través del sitio de corticotomía (Ugalde C et al, 2012)

La distracción del fijador externo, y por ende, del espacio del defecto óseo, debe darse a razón de $\frac{1}{4}$ de milímetro cada 6 horas, después de un periodo de latencia. Lo anterior permite el transporte óseo en el sitio de escisión. Se debe mantener la fijación hasta la maduración del hueso neoformado (Ugalde C et al, 2012) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Como se mencionó previamente, el transporte óseo se compone de diferentes pasos. El primer paso consiste en la división ósea, la cual puede llevarse a cabo mediante una corticotomía o una osteotomía. La corticotomía se define como la división de la cortical de baja energía con preservación del suministro de sangre cortical y medular, y se caracteriza por ser un procedimiento quirúrgicamente demandante para el cirujano. Por otra parte, no se han descritos ventajas biomecánicas con respecto a la osteotomía (Khaleel A et al, 2001) (Ugalde C et al, 2012)

La región metafisaria es el sitio óptimo para la realización de la corticotomía porque proporciona la mayor superficie para la actividad biológica, debido a que presenta mayor flujo sanguíneo y circulación colateral, una corteza delgada que facilita la división, mayor estabilidad y un diámetro óseo más ancho (Ugalde C et al, 2012) (Khaleel A et al, 2001). La osteotomía, por su parte, implica la división ósea a través de ambas corticales (Khaleel A et al, 2001).

Una vez realizada la sección ósea, es necesario realizar una fijación estable de los fragmentos, la cual es posible mediante diferentes técnicas, las cuales se describirán más adelante (Khaleel A et al, 2001).

Una vez fijado los fragmentos a transportar, se requiere un periodo de latencia, previo al inicio de la distracción ósea. El periodo de latencia fue descrito por Abbott en 1927, y se refiere a un periodo de

descanso entre 7 y 10 días luego de la corticotomía u osteotomía (otros autores recomiendan entre 4 y 5 días) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004) (Khaleel A et al, 2001).

La distracción se inicia al concluir el periodo de latencia. Se recomienda realizar la distracción a 1mm/día, divididos en 4 aumentos graduales. Una velocidad de distracción reducida conduce a la consolidación temprana del sitio de distracción, o bien, al cierre de la osteotomía; por el contrario, un aumento de la velocidad de distracción, puede ocasionar la formación de estructuras anormales y fibrosis (Khaleel A et al, 2001) (Ugalde C et al, 2012) (Flores-Espinosa JA et al, 2011)

Se requieren alrededor de 2 a 3 días por día de distracción ósea, para alcanzar la consolidación del hueso neiformado. Cuando se utiliza injerto óseo, por lo general, se aplica en el sitio de anclaje y los extremos del hueso pueden refrescarse para estimular la cicatrización. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

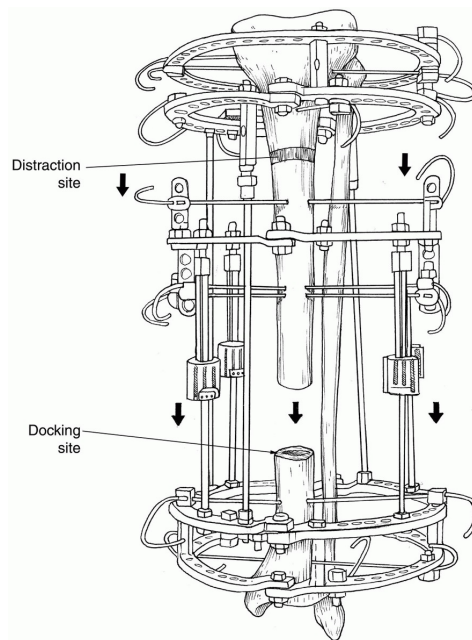


Figura 6. Esquemática del transporte óseo. Distraction site: sitio de distracción. Docking site: sitio de unión. Tomado de: DeCoster, Thomas A. MD; Gehlert, Rick J. MD; Mikola, Elizabeth A. MD; Pirela-Cruz, Miguel A. MD Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: January 2004 - Volume 12 - Issue 1 - p 28-38

Tipos de distracción ósea

Existen diferentes tipos de distracción ósea. La distracción ósea monofocal implica una osteotomía única y una distracción entre los dos extremos de una osteotomía. La osteotomía bifocal, requiere una doble osteotomía, una de ellas se realiza en un extremo del defecto óseo, y la otra en la porción sana del hueso, creando un disco de transporte para la elongación. Las distracciones trifocales generalmente poseen un disco de transporte por cada lado del defecto óseo o fractura, y ambos discos son llevados hacia el lado contrario hasta que hagan contacto, donde finalmente se aplican fuerzas de compresión y se logra la unión ósea de los fragmentos (Flores-Espinosa JA et al, 2011) (Khaleel A et al, 2001).

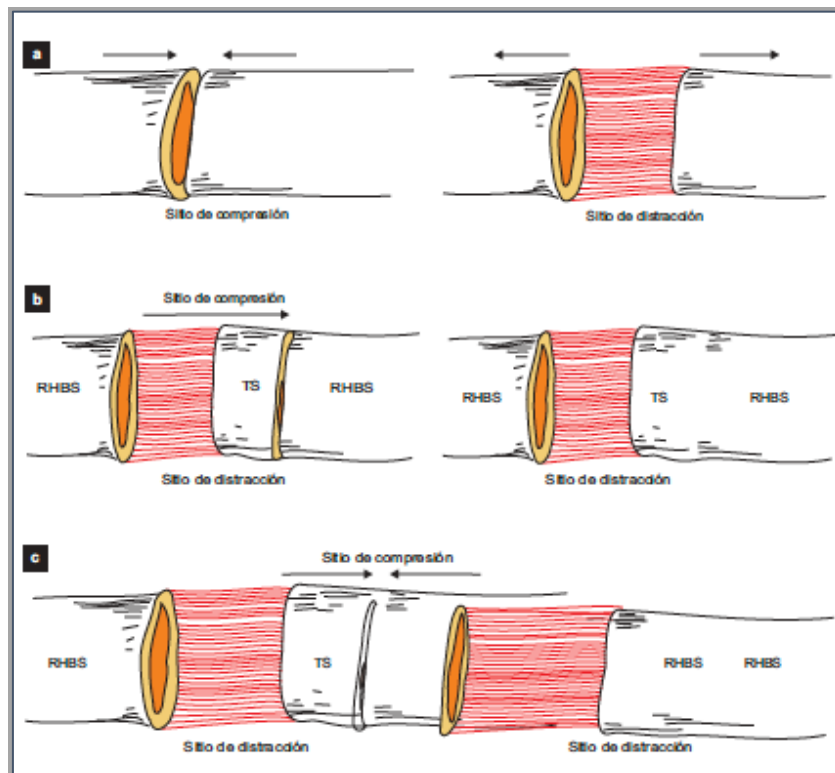


Figura 7. Tipos de distracción ósea. Tomado de Revista Medica del Instituto Mexicano del Seguro Social. 2011; 49 (6): 659-664

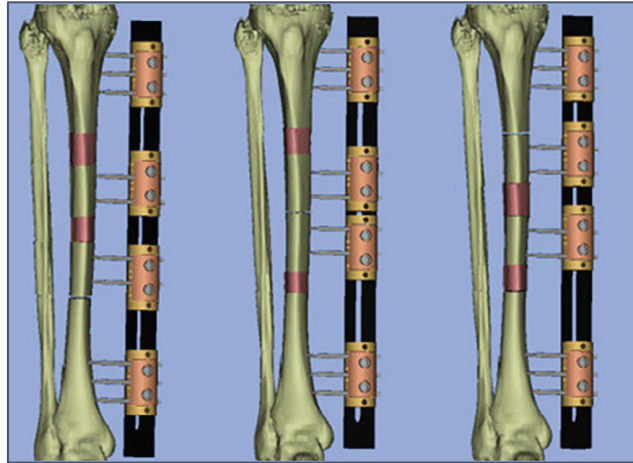


Figura 8. Esquema ilustrativo de un transporte óseo trifocal. Tomado de Orthopaedic Surgery 2020;12:184–193.

Un estudio realizado entre junio de 2006 y junio del 2016, en China, donde se incluyeron 37 pacientes con una edad promedio de 40 años, que presentaron grandes defectos tibiales secundarios a infección ósea, comparó los resultados del transporte óseo bifocal y el transporte óseo trifocal, con un seguimiento a 24 meses plazo. Los resultados del estudio mostraron que no hubo diferencias estadísticamente significativas en las complicaciones posoperatorias. Además mostró, que el resultado funcional postoperatorio en el grupo de distracción trifocal fue superior a los del grupo de distracción bifocal con un seguimiento mínimo de 24 meses. La velocidad de alargamiento, duración de la consolidación regenerada y la unión de acoplamiento fue significativamente menor en el grupo trifocal en comparación con el grupo bifocal (Yushan M et al, 2020).

Posterior al tiempo de distracción, prosigue la consolidación ósea, la cual se considera que puede tardar de 8 a 12 semanas, dependiendo del hueso a transportar y del tamaño del defecto óseo. Usualmente se describe que por cada día de distracción ósea, se requieren de 2 a 3 días para la consolidación ósea. Una vez lograda la consolidación ósea, se puede retirar el fijador externo y realizar una fijación interna que brinde sostén y protección al hueso neoformado (Flores-Espinosa JA et al, 2011) (Ugalde C et al, 2012).

Una vez que se logra la consolidación ósea y la consecuente formación del callo duro en la zona de distracción, el hueso entra en el proceso de remodelación ósea, el cual suele tomar un tiempo mayor a la consolidación, que incluso puede abarcar años (Ugalde C et al, 2012).

Tipos de transporte óseo

Los transportes óseos se pueden categorizar de acuerdo al método de distracción empleado, así como mediante el tipo de fijación empleada. (Rigal S et al, 2012)

I. Técnicas de distracción en el transporte óseo

Las técnicas de distracción más comunes, incluyen el acortamiento aislado, el acortamiento óseo seguido de alargamiento inmediato o diferido, y el transporte óseo vertical segmentario (Rigal S et al, 2012)

El acortamiento óseo seguido de un alargamiento inmediato o diferido, presenta una diferencia entre el alargamiento por distracción en la zona de no unión posterior a un periodo corto de compresión, y el alargamiento óseo en un área de corticotomía distante al sitio de fractura o de pérdida de tejido óseo (Rigal S et al, 2012).

Por su parte, el transporte óseo vertical segmentario, se basa en el transporte progresivo de un segmento óseo después de la corticotomía (Rigal S et al, 2012).

Un estudio multicéntrico, realizado mediante revisión de expedientes, incluyó a 38 pacientes con pérdida ósea asociada. Se dividieron los mismos en 4 grupos de acuerdo a la longitud de la pérdida ósea: grupo A <2cm, grupo B de 2 a 5cm, grupo C de 5 a 10cm, grupo D > 10cm. Se analizaron de forma separada los resultados de acuerdo a la técnica de transporte óseo utilizada, siendo éstas acortamiento aislado, compresión seguida de distracción, acortamiento seguido de alargamiento luego de una corticotomía, y transporte de un segmento de hueso. Los resultados mostraron una consolidación en 37 de 38 pacientes, en un promedio de 14,9 meses, con un promedio de consolidación del hueso neoformado de 1cm en 5 meses para el fémur y 1 cm en 3 meses para la tibia. En las complicaciones asociadas, la rigidez se presentó en 8 casos, de los cuales 6 se asociaron directamente con el uso de transporte óseo. En los casos de transporte óseo segmentario, fue necesario el uso de injerto óseo autólogo (Rigal S et al, 2012).

El estudio permitió especificar las indicaciones de las diferentes técnicas de transporte óseo, de modo que recomiendan el transporte óseo aislado para defectos menores a 3cm (especialmente en húmero); además, recomiendan la técnica de compresión-distracción en el sitio de fractura en defectos menores a 3cm. El acortamiento asociado con el alargamiento distal al sitio de la fractura muestra mayor utilidad en el fémur y la tibia cuyos defectos óseos varían entre los 3cm y los 6cm. El transporte óseo segmentario es la única técnica que puede tratar el defecto óseo asociado con el acortamiento de la extremidad inferior. Los casos de defectos óseos mayores a 10cm de longitud, se recomienda particularmente el transporte óseo segmentario, aunque algunos autores recomiendan tomar en cuenta el transporte óseo vascularizado y las técnicas con membrana inducida, las cuales, se encuentran más allá de los objetivos del presente escrito (Rigal S et al, 2012).

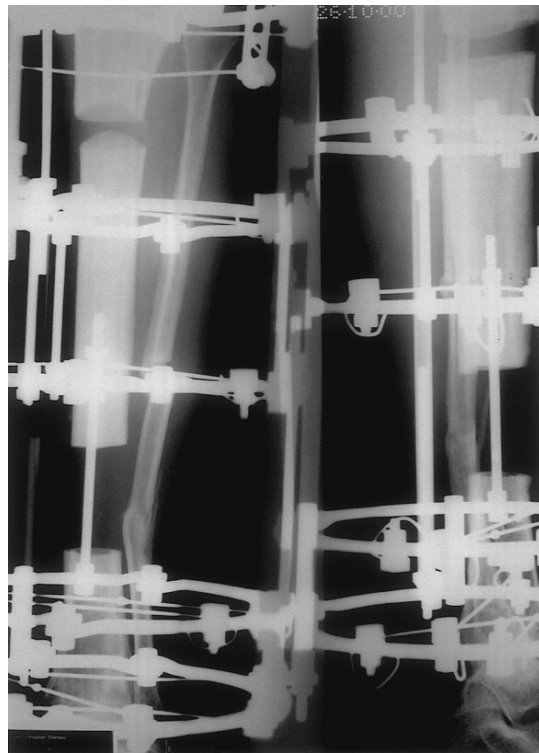


Figura 9. Radiografía que muestra transporte óseo segmentario en tibia con no unión secundaria a infección ósea. Tomado de Current Orthopaedics (2001) 15, 229-237

II. Técnicas de fijación en el transporte óseo

Los transportes óseos también pueden clasificarse de acuerdo al método de fijación de fragmentos óseos.

Ila. Transporte óseo con fijación externa

El transporte óseo externo, implica el uso de dos o más componentes que están conectados pero que se pueden mover de forma independiente. Esta técnica es útil cuando el defecto a corregir es menor a 5 – 7cm, permite una aplicación fácil del mismo y la corrección de deformidades angulares y rotacionales simultáneamente; sin embargo suele ser incómodo y pesado para el paciente, es estéticamente poco agradable y poco aceptado, limita las actividades básicas de la vida diaria, por lo que puede resultar en un poco adherencia al tratamiento o inclusive, el abandono de mismo (Ugalde C et al, 2012) (Khaleel A et al, 2001).

El fijador externo monoplanar disminuye los problemas de tejido blando de los alambres de transfijación. Estos fijadores de riel tienen múltiples pinzas de sujeción que se deslizan a lo largo de los rieles para lograr el transporte o elongación ósea. Son particularmente útiles cuando no se requiere corrección angular. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

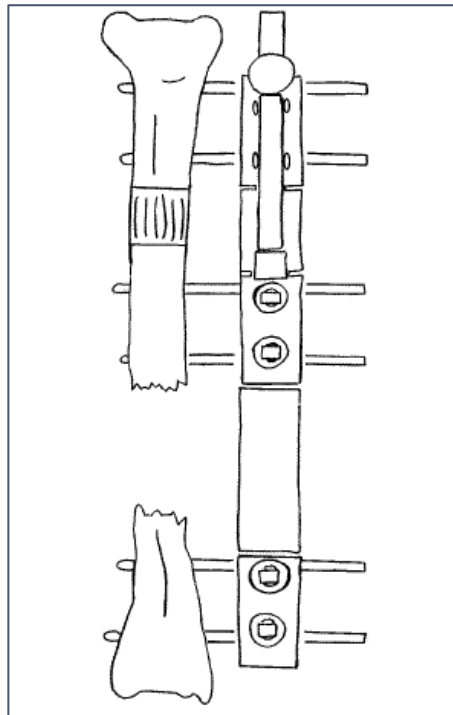


Figura 10. Esquema de transporte óseo externo utilizando un fijador externo monolateral. Tomado de Current Orthopaedics (2001) 15, 229-237.

IIb. Transporte óseo interno

El transporte óseo interno utiliza alambres oblicuos para que los componentes estén inmóviles entre sí. Suele ser útil para defectos óseos de 7-10 cm o más y cuenta con la ventaja de ser más fácil de manipular por el paciente y producir menos cicatrices en la piel. Sin embargo, presenta como desventaja que su configuración puede ser técnicamente difícil para el cirujano y la fuerza de compresión puede resultar insuficiente en el sitio de acoplamiento para permitir la unión ósea.

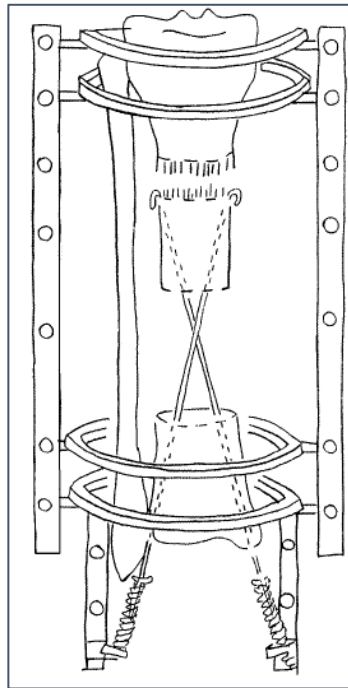


Figura 11. Esquema de transporte óseo interno utilizando un fijador externo circular. Tomado de *Current Orthopaedics* (2001) 15, 229-237.

IIc. Transporte óseo interno y externo o combinado.

El transporte óseo interno-externo o combinado permite la corrección de defectos óseos de más de 10 cm en áreas de cicatrización profunda de tejidos blandos o con un deficiente suministro de sangre local. El fijador se aplica con agujas/alambres transversales en un segmento y oblicuos en el otro (Khaleel A et al, 2001).

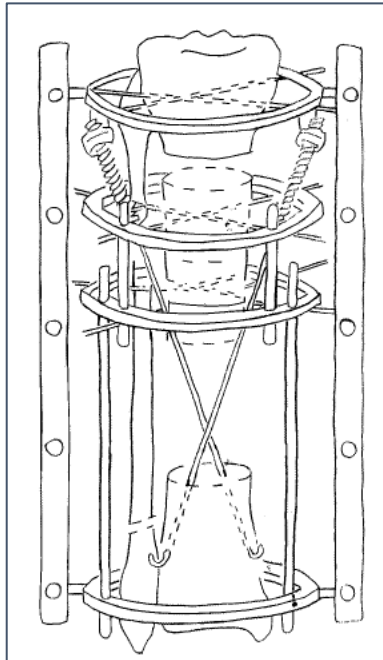


Figura 12. Esquema de transporte óseo interno-externo (combinado) utilizando un fijador externo circular. Tomado de Current Orthopaedics (2001) 15, 229-237.

IId. Fijación combinada con clavo intramedular

La fijación combinada con clavo intramedular es otra técnica de fijación de fragmentos en el transporte óseo. Dicha técnica tiene la particularidad de que contradice la creencia original de Ilizarov sobre la importancia primordial del suministro de sangre intramedular. Presenta como ventajas el acortamiento del período de tratamiento con el fijador externo y ofrece un control direccional sobre el hueso regenerado. Por otra parte, la decisión de optar por este tipo de fijación debe contemplar el riesgo de falla por fatiga del clavo intramedular y/o los pernos de bloqueo y la infección intramedular (Khaleel A et al, 2001)

La distracción sobre un clavo reduce el tiempo de uso del fijador externo, permite un retorno más temprano de la función y minimiza la incidencia de mala alineación. Las posibles desventajas incluyen la interrupción del hueso regenerado por el clavo y el riesgo de infección medular por contaminación del clavo por el clavo. (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Ile. Fijación externa combinada con placa

La fijación externa combinada con placa es útil en pacientes con pobre stock óseo. El procedimiento se lleva a cabo en dos fases. En la primera fase, se realiza una debridación de tejidos blandos, se administra, de ser necesario, antibióticos intravenosos y se coloca un espaciador de cemento en la zona del defecto óseo resecaado. Luego se coloca el dispositivo de fijación externa (Khaleel A et al, 2001).

En la Segunda fase, se realiza una corticotomía de perforación de baja energía en la ubicación planificada, con lo cual se crea el segmento de transporte vascularizado. Posteriormente se coloca un clavo intramedular y la fijación se refuerza con una placa lateral. Debido al gran número de procedimientos asociados a esta técnica, no se considera una técnica de elección en el transporte óseo (Khaleel A et al, 2001) (Kähler U, 2019).

Seguimiento de los casos

Los pacientes sometidos a un transporte óseo requieren un seguimiento exhaustivo, el cual se recomienda sea semanal. El seguimiento puede ser ambulatorio, pero éste debe ser continuo, sin interrupción, para que las posibles complicaciones sean identificadas y tratadas con la mayor brevedad posible (Ugalde C et al, 2012).

Complicaciones del transporte óseo

En cuanto a las complicaciones asociadas directamente a la técnica quirúrgica, una mala colocación de fijador externo puede ocasionar un retraso en la neoformación ósea, que implique procedimientos adicionales para mantener la alineación, como el cambio de la posición de las agujas y el ajuste de los aros. La unión defectuosa y la mala alineación en el sitio de acoplamiento también pueden ser consecuencia de la mala colocación inicial del fijador externo (Magadum M et al, 2006) (Liu Y et al, 2020)

La infección en el trayecto de las agujas del fijador externo es la complicación más frecuente del transporte óseo. Al estar presente, la infección del trayecto de los pernos aumenta el riesgo de que el sistema de fijación se afloje debido al exceso de carga soportado por el fijador externo, lo cual provoca

inestabilidad en el sistema de fijación. La inestabilidad a su vez produce retrasos en la neoformación y consolidación ósea (Magadum M et al, 2006).

La infección del trayecto de los pines (agujas), avanza desde la superficie de la piel hacia el hueso. Cuando se presenta una infección en los tejidos profundos, se produce el aflojamiento del pin y la consecuente inestabilidad del sistema de fijación. Paley clasifica la infección del trayecto de los pines en tres estadios: el estadio 1 implica la inflamación de los tejidos blandos, en el estadio 2 se presenta la infección de tejidos blandos y en el estadio 3 la infección alcanza el hueso (Ugalde C et al, 2012) (Liu Y et al, 2020)

El transporte con una velocidad mayor a 1mm/día se asocia con ruptura de la piel y aumenta el riesgo de infecciones. El germen más comúnmente asociado es el *Staphylococcus aureus* (Ugalde C et al, 2012).

La segunda complicación más común es la falta de unión en el sitio de acoplamiento del hueso nativo y el hueso regenerado. Esta complicación suele evitarse con el uso de injertos de cresta iliaca, o el uso de materiales alogénicos y recombinantes que aumentan la velocidad de consolidación del sitio de anclaje. Se ha demostrado que el aumento del sitio de acoplamiento disminuye tanto la tasa general de no unión como el tiempo de marco. (Watson T, 2006)

El dolor en el sitio quirúrgico es una complicación común en el transporte óseo. Usualmente es secundario a la distensión de los tejidos blandos y aumentar los ejercicios de estiramiento o reducir la velocidad de distracción a la mitad, permiten aliviar el dolor y continuar con el tratamiento (Ugalde C et al, 2012).

El retraso en la consolidación, puede ser secundario a una corticotomía traumática, inestabilidad del sistema de fijación y/o a una rápida distracción. La infección, la malnutrición y los desórdenes metabólicos aumentan el riesgo de retraso de la consolidación (Ugalde C et al, 2012).

La refractura en el segmento de hueso neoformado y la consolidación prematura son potenciales complicaciones del transporte óseo. La consolidación prematura se asocia en la mayoría de los casos a una osteotomía incompleta, aunque puede deberse a un largo periodo de latencia (retraso en el inicio de la distracción) o a una tasa de elongación menor de 0,5mm por día (Ugalde C et al, 2012).

Las deformidades angulares como complicaciones del transporte óseo suelen deberse a una respuesta desigual de los grupos musculares, la inestabilidad de los pines o a una fijación insuficiente (Ugalde C et al, 2012) (Omer A et al, 2018).

La deformidad tardía y el colapso de la extremidad alargada, suele ocurrir como consecuencia de la consolidación temprana del sitio de anclaje, con respecto a la consolidación en el sitio de regeneración. Esta complicación requiere un manejo complejo, por lo que prevenirla es crucial. La estimulación eléctrica y ultrasonográfica, así como el uso de adyuvantes ortobiológicos, han sido útiles para acelerar la consolidación de los segmentos regenerados y prevenir los defectos angulares antes de retirar el marco de fijación externa (Watson T, 2006).

La no unión del segmento transportado puede ser causado por una infección (la cual se trata con debridación y tratamiento antibiótico), así como por una incongruencia en la reducción de la velocidad de distracción vs la compresión (Ugalde C et al, 2012) (Omer A et al, 2018)

Algunas complicaciones menores en frecuencia como la inversión de los bordes cutáneos, la lesión nerviosa y/o vascular y el acortamiento de tendones, deben tenerse presente y descartarse en cada valoración semanal. El repliegue de tejido blando y la interposición en el “docking site”, evita la adecuada compresión del hueso en la zona de acoplamiento. (Magadum M et al, 2006). (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004) (Ugalde C et al, 2012) (Miraj F, 2018)

Recomendaciones para mejorar los resultados del transporte óseo

Recientemente, se han descrito mejoras técnicas para la osteogénesis por distracción con transporte óseo, tales como el diseño de fijadores y clavijas más estables, el acortamiento con distracción gradual, el uso de dispositivos intramedulares estabilizadores, y la combinación con técnicas osteobiológicas y adyuvantes. Dichos avances han permitido disminuir la morbilidad y el tiempo de uso del fijador externo en los procedimientos de reconstrucción. (Watson T, 2006)

Paley planteó algunas consideraciones importantes que favorecen la obtención de resultados óptimos en el transporte óseo, entre las cuales se describen una fijación estable, el preferir la corticotomía sobre la osteotomía, realizar una osteotomía percutánea para preservar la vascularidad del periostio y endostio, preferir las osteotomías metafisiarias por encima de las diafisiarias, evitar la diastasis inicial en los extremos óseos de las corticotomías y osteotomías, garantizar un periodo de latencia de 5 a 14

días antes de la distracción ósea, mantener la distracción ósea a menos de 1mm/día, y preferir la distracción en varios tiempos (se recomienda 4 tiempos de 0,25mm) (Paley D, 1989).

Se debe buscar la fijación más estable con menor complejidad asociada, con el fin de prevenir el uso de marcos complejos, cuyos múltiples alambres de transfixión se adhieren a estructuras musculotendinosa comprometiendo la función de las extremidades, favoreciendo el desarrollo de dolor crónico y las infecciones del trayecto de los clavos. En este contexto se prefieren los marcos hexagonales simples con el uso de medios-pasadores y el uso de transportes monolaterales, que permiten los ajustes en el sitio de acomplamiento sin comprometer la alineación, como suele ocurrir en los marcos circulares tradicionales (Watson T, 2006)

Los pines cubiertos con hidroxiapatita proporcionan un aumento significativo en la aposición ósea directa con una disminución en la interposición de tejido fibroso. Presentan una biocompatibilidad mejorada, con menor tensión en la interfaz entre el hueso y el clavo que posee el titanio y sus alineaciones. Además, pueden mantenerse por un periodos prolongados sin que se aflojen o infecten, mejorando la comodidad del paciente y reduciendo el estrés causado por el riesgo de infección y aflojamiento (Watson T, 2006)

Actualmente, la ortobiología permite aumentar la regeneración y consolidación ósea en los transportes óseos. La aplicación percutánea de factores neo-adyuvantes como los factores de crecimiento es ejemplo de ello (Watson T, 2006)

El uso de fijación interna con clavos puede disminuir el tiempo de uso de marco de fijación externa, al proporcionar un soporte al hueso neoformado mientras este consolida, previniendo además las deformidades por angulación (Watson T, 2006)

Evidencia científica actual de los resultados del transporte óseo

Los resultados radiológicos y funcionales de las técnicas de transporte óseo suelen evaluarse mediante el sistema de la Asociación del estudio y la aplicación de los métodos de Ilizarov (ASAMI, por sus siglas en inglés) (Fahad S, Habib AA, Awais MB, Umer M, Rashid HU, 2019)

Tabla 2. Resultados radiológicos y funcionales usando el sistema de la Asociación del estudio y la aplicación de los métodos de Ilizarov. (Fahad S, Habib AA, Awais MB, Umer M, Rashid HU, 2019)

	Resultados radiológicos	Resultados biológicos
Excelente	Unión, sin infección, deformidad angular <7°, discrepancia < 2,5cm	Activo Sin cojera, rigidez mínima (pérdida de <15° de extensión de rodilla/< 15° de dorsiflexión de tobillo) Sin distrofia simpática refleja Dolor insignificante
Bueno	Unión con dos de los siguientes: a. ausencia de infección b. deformidad angular <7° c. discrepancia < 2,5cm	Activo, con una o dos de las siguientes: a. cojera b. rigidez c. distrofia simpática refleja d. dolor significativo
Adecuado	Unión con una de las siguientes: a. ausencia de infección b. deformidad angular <7° c. discrepancia < 2,5cm	Activo, con tres de las siguientes: a. cojera b. rigidez c. distrofia simpática refleja d. dolor significativo
Pobre	No unión, refractura o unión con infección, deformidad angular > 7°, discrepancia > 2.5cm	Inactivo (desempleado o inhabilitado para el retorno a sus actividades básicas diarias debido a su lesión).

Farmanullah, Khan MS, Awais SM, realizaron un estudio en 58 pacientes con no unión de fracturas en tibia de 2 a 7cm, con un promedio de 2,9cm. La falta de consolidación fue secundaria a trauma o heridas por arma de fuego. La edad promedio fue de 30 años, y el seguimiento se dio por 1 año. Los resultados radiológicos fueron excelentes en 33 (58,89%) pacientes, buenos en 12 (20,68%) pacientes, regulares en 8 (13,79%) pacientes y malos en 5 (8,62%) pacientes. Los resultados clínicos fueron excelentes en 33 pacientes (56,89%), buenos en 18 pacientes (31,05%), regulares en 4 (6,89%) pacientes y malos en 3 pacientes (5,17%). Los autores concluyeron que el fijador de anillo de Ilizarov es una excelente modalidad de tratamiento para la pseudoartrosis tibial con un defecto, con respecto a la unión ósea, corrección de la deformidad, erradicación de infecciones, logro de la longitud de la extremidad y función de la extremidad, pero esto requiere una curva de aprendizaje prolongada para los cirujanos ortopédicos nuevos. (Farmanullah, Khan MS, Awais SM.)

En términos generales, las diferentes técnicas de reconstrucción ósea requieren tratamientos prolongados. Se estima que cada centímetro de defecto óseo tarda 1,5 meses en cicatrizar. (Watson J T, Anders M, Moed B, 1995)

Watson et al, analizaron 50 pacientes con fractura de tibia con pérdida de la circunferencia del tejido óseo, las cuales fueron sometidas a estabilización ósea, además de lavados y desbridaciones seriadas. Se estabilizaron las fracturas mediante fijadores externos y clavos intramedulares sin rimar, así como mediante el uso de fijación con placa (en pocos casos). Se utilizaron diferentes técnicas de reconstrucción ósea tales como el transporte óseo y la transferencia de peroné vascularizado libre. Se dio un seguimiento promedio de 18 meses. El uso de injerto de peroné vascularizado no fue exitoso. Las técnicas de reconstrucción no tuvieron correlación con el desarrollo de no unión o infección. La diferencia en los tiempos de tratamiento (tiempo total de tratamiento y tiempo hasta la consolidación ósea) en pacientes con fracturas de la diáfisis tibial con pérdida ósea que fueron tratados con clavos sin fresar (promedio, 43 semanas) o fijadores externos (promedio, 45 semanas) no fueron estadísticamente significativos. Se concluyó que las técnicas de reconstrucción cuidadosamente organizadas conducen a resultados exitosos. (Watson J T, Anders M, Moed B, 1995) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Green et al, compararon 15 pacientes tratados con injerto óseo con 17 pacientes tratados con transporte óseo tipo Ilizarov. El tiempo de tratamiento fue idéntico para ambos grupos: 1,9 meses de fijación por cada centímetro de defecto reconstruido. En cuanto a complicaciones, el injerto óseo presentó disponibilidad limitada del injerto, morbilidad del sitio donante (tres pacientes) y fracturas del injerto (dos pacientes). En cuanto al grupo de pacientes tratados con transporte óseo, los principales problemas fueron la falla del sitio de acoplamiento para unirse sin un injerto suplementario (siete pacientes) y contracturas articulares (siete pacientes). (Green S, 1994)

En una comparación de las técnicas de transporte óseo e injerto óseo, Green informó que ambos compartían las complicaciones asociadas con la fijación externa. Además, cada uno tenía su propio conjunto único de complicaciones. El grupo de injerto óseo (15 pacientes) mostró una disponibilidad limitada del injerto, morbilidad del sitio donante (20%) y refractura (13%). El grupo de transporte óseo (17 pacientes) mostró un retraso en la consolidación en el sitio de acoplamiento (41%) y contractura articular (41%). El transporte óseo fue aplicable a espacios > 5 cm, mientras que el injerto óseo no lo fue. (Green S, 1994)

Cierny y Zorn compararon las técnicas convencionales (injerto óseo, 23 pacientes) e Ilizarov (transporte óseo, 21 pacientes) para defectos tibiales segmentarios y concluyeron que se logró un manejo exitoso después del primer tratamiento en el 70% de ambos grupos. La tasa de éxito global fue del 95% en ambos grupos. El grupo de Ilizarov tuvo una mayor tasa de complicaciones (60% versus 33%); sin embargo, también tenía un porcentaje más alto de hueso comprometido. El grupo de pacientes tratados con el método de Ilizarov mostró beneficios sobre el grupo de injerto óseo convencional, que incluyen menos días de hospitalización, menos meses de discapacidad (17 frente a 22), menos tiempo en el departamento de cirugía y menor costo. Además, encontraron ventajoso el transporte bifocal para acelerar la consolidación de grandes defectos, lo cual es controversial, porque otros autores han reportado un aumento sustancial de las complicaciones con el uso de transporte bifocal (Cierny G, 1994)(DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Marsh et al reportaron una incidencia de complicaciones similares para el transporte óseo y el injerto óseo, en pacientes con falla de consolidación o no unión en tibias infectadas con pérdida ósea asociada, tales como la consolidación defectuosa, la recurrencia de la infección, el número de procedimientos quirúrgicos y el número de complicaciones. La discrepancia de la longitud de extremidades fue significativamente menor en los pacientes tratados con transporte óseo (0.4cm) con respecto a los pacientes tratados con injerto óseo (2.0cm). (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004)

Watson et al estudiaron un grupo de pacientes con fracturas de la diáfisis tibial con pérdida ósea asociada, y compararon los resultados del uso de injerto autólogo posterolateral, injerto directo y transporte óseo. Encontraron una menor consolidación defectuosa en pacientes con transporte óseo (<5%) que en aquellos tratados con injerto autólogo posterolateral (80%) e injerto directo (34%) (DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M, 2004).

Discusión

El transporte óseo es una técnica quirúrgica útil para el manejo de lesiones traumáticas severas, con defectos óseos diafisarios de gran tamaño, con o sin compromiso de tejidos blandos asociados.

El transporte óseo consiste en la movilización progresiva de un segmento libre de hueso vivo, de forma longitudinal a través de la pérdida de sustancia ósea, que da como resultado una osificación espontánea, progresiva, y de excelente calidad biológica en la zona de distracción.

El transporte óseo está indicado en pérdidas óseas diafisarias mayores a 4cm y menores de 12 cm, sean estas por trauma, defectos congénitos, trastornos del crecimiento y desarrollo óseo, o secundarias a infecciones.

Las técnicas de transporte óseo tienen como ventaja la posibilidad de erradicar la infección de forma concomitante, mientras se tratan los defectos óseos. Además, permite corregir las deformidades angulares y la discrepancia en la longitud de las extremidades. Por otra parte, permite reducir el tamaño del defecto de los tejidos blandos, mantener el ancho de la diáfisis del hueso y evitar o disminuir el requerimiento de injertos óseos y de tejidos blandos. Sin embargo, dichos procedimientos asocian un alto costo y una alta tasa de fracaso.

El transporte óseo es dependiente del compromiso del paciente y del equipo de salud tratante, requiere varios procedimientos quirúrgicos y el tiempo de tratamiento es prolongado, lo cual suelen ser factores desmotivantes para los pacientes.

El principio biomecánico en el cual se basa el transporte óseo fue descrito por Ilizarov y está basado en el efecto tensión-estrés sobre el hueso. La osteotomía y la corticotomía estimulan la actividad proliferativa y metabólica de los tejidos tanto óseo como blandos, por lo cual se genera tejido óseo en la región proximal y distal al defecto segmentario.

La distracción favorece la formación ósea a partir de colágeno tipo 2, así como el desarrollo y crecimiento de tejido muscular, las fascias, tejido nervioso y cutáneo. El hueso se forma predominantemente mediante osificación intramembranosa, la cual es favorecida por el ácido ascórbico y la vitamina D.

El lavado quirúrgico y el desbridamiento de las lesiones es fundamental para el éxito del transporte óseo. Posteriormente, la técnica quirúrgica conlleva la realización de una corticotomía u osteotomía, preferiblemente a nivel metafisiario. A continuación, se deben fijar los fragmentos óseos. Luego, es necesario un periodo de latencia de entre 7 y 10 días. Posteriormente se procede a iniciar la distracción con el fijador externo. La velocidad recomendada para la distracción ósea es de 1mm por día.

Existen diferentes tipos de distracción ósea, entre las cuales se encuentran la distracción ósea monofocal, la distracción con osteotomía y las distracciones trifocales. Una vez lograda la consolidación ósea, se procede a retirar el colocar y proteger al hueso neoformado mediante técnicas de fijación interna, durante el proceso de remodelación ósea.

La técnica de transporte óseo diseñada por Ilizarov, se puede llevar a cabo mediante un acortamiento aislado, acortamiento óseo seguido de alargamiento inmediato o diferido, y el transporte óseo vertical segmentario.

Existen diferentes tipos de fijación externa en el transporte óseo, tales como el transporte óseo con fijación externa, el Transporte óseo interno, el transporte óseo interno y externo o combinado, la fijación externa combinada con clavo intramedular y la fijación externa combinada con placa.

Los pacientes sometidos a procedimientos de transporte óseo requieren un seguimiento exhaustivo por su médico tratante (idealmente semanal). Esto permite valorar el avance del proceso, el compromiso del paciente y las posibles complicaciones del tratamiento.

La complicación más común del transporte óseo es la infección en el trayecto de las agujas de fijación. Otras complicaciones asociadas al transporte óseo incluyen el repliegue de tejido blando y la interposición en el "docking site", la ruptura de la piel circundante, el aflojamiento de los pernos, la inestabilidad del sistema, la osteomielitis, la ruptura de la piel, el cierre de la osteotomía, retraso en la consolidación o consolidación prematura, defectos angulares, no unión del segmento transportado, lesiones vasculares y/o nerviosas, entre otras.

Actualmente se describen diferentes modificación a la técnica tradicional de transporte óseo para mejorar los resultados del mismo.

Entre ellas se describen la búsqueda de una fijación estable, preferir la corticotomía sobre la osteotomía, en caso de realizar una osteotomía realizarse de forma percutánea para preservar la vascularidad del periostio y endostio, preferir las osteotomías metafisiarias por encima de las diafisiarias, mantener la distracción ósea a menos de 1mm/día, y preferir la distracción en varios tiempos .

Además, se recomienda utilizar marcos de fijación más simples y menor número de agujas para prevenir el compromiso del tejido muscular y tendinoso, así como el tiempo quirúrgico, la morbilidad del paciente y el riesgo de infección. El uso de agujas de hidroxiapatita favorecen la aposición ósea directa, con una menor formación de tejido fibroso a su alrededor; además, suelen mantenerse anclados al hueso por mayor tiempo, con menor incidencia de aflojamientos e infección.

La combinación del fijador externo con dispositivos intramedulares estabilizadores, y la el uso de técnicas osteobiológicas y adyuvantes han permitido disminuir la morbilidad y el tiempo de uso del fijador externo, así como la tolerancia del marco, en los procedimientos de reconstrucción.

La evidencia científica actual se muestra a favor del uso del transporte óseo para el manejo de defectos segmentarios óseos de gran tamaño, encontrando superioridad en cuanto a resultados radiográficos y clínicos, con tasas de complicaciones menores que las descritas en técnicas como el injerto vascularizado.

Conclusiones

El transporte óseo es una técnica quirúrgica que consiste en la movilización progresiva y controlada de un segmento libre de hueso vitalizado, cuyo resultado esperado es la osificación espontánea y de buena calidad, capaz de rellenar el espacio dejado por un hueso no viable previamente resecado. El transporte óseo se puede llevar a cabo mediante el uso de corticotomías u osteotomías, las cuales pueden ser unifocales, bifocales o trifocales. Los fragmentos óseos se pueden fijar únicamente con fijadores externos, con fijadores internos aislados, o en combinación de técnicas de fijación interna y externa.

El principio biomecánico del transporte óseo se basa en el efecto de la tensión y estrés sobre el hueso. La osteotomía y la corticotomía estimulan la osteogénesis, así como la vascularización y el crecimiento longitudinal del tejido nervioso, fascias y tejido cutáneo. La distracción favorece la formación ósea, la cual ocurre principalmente por osificación intramembranosa.

El transporte óseo está indicado en pérdidas óseas diafisarias mayores a 4cm y menores de 12 cm, agudas o crónicas, asociadas o no a infecciones, tales como pérdida ósea aguda por trauma, defectos congénitos, trastornos del crecimiento y del desarrollo óseo, o secundarias a infecciones, entre otras. Permite además la corrección de defectos angulares y la estabilización ósea durante el tratamiento de las osteomielitis. El transporte óseo tiene como inconveniente su alto costo, el tiempo prolongado de tratamiento, y la pobre tolerancia y adherencia al tratamiento que desarrollan algunos de sus pacientes, así como lo incierto de sus resultados.

La complicación más común del transporte óseo es la infección en el trayecto de las agujas de fijación. La segunda complicación más común es la no unión en el sitio acoplamiento. Otras complicaciones del transporte óseo incluyen las lesiones del tejido blando adyacente, la fractura del hueso transportado, el cierre o retraso del cierre de las osteotomías, los defectos angulares, las lesiones vasculares y nerviosas, entre otras.

Actualmente, diversos estudios han encontrado beneficiosas ciertas modificaciones a la técnica tradicional del transporte óseo tales como el uso de agujas de hidroxipatita, el uso de marcos de fijación lo más simples posibles, la distracción en varios tiempos a una velocidad menor a 1mm/día, el uso de clavos intramedulares y, de sustancias osteobiológicas y adyuvantes para favorecer la consolidación adecuada del hueso neoformado. Por otra parte, existe evidencia científica

suficiente para considerar el transporte óseo una técnica adecuada para el manejo de los defectos óseos segmentarios, al encontrar que esta técnica quirúrgica alcanza tasas de consolidación y resultados clínicos iguales o superiores a las de otras técnicas como los injertos óseos, así como menor tasa de complicaciones.

Referencias bibliográficas

- Fletcher C. (2007). Use of Bone Transport in the Management of Large Diaphyseal Tibial Defects. *Orthopedics and Rheumatology*, 5.
- Rigal S et al. (2012). Bone transport techniques in posttraumatic bone defects. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 103—108.
- Demir B et al. (2008). A modified technique of internal bone transport. *Acta Ortopédica Belga*, 74, 216-221.
- Veloz F et al. (s.f.). Transporte óseo en secuelas de fracturas expuestas. *Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología*, 62(1), 111-114.
- Tetsworth K. (2018). Bone Transport versus Acute Shortening for the Management of Infected Tibial Non-Unions with Bone Defects. *Injury*, 28.
- Miraj F. (2018). Bone transport procedure as an effective technique in managing large bone defect of tibia. *Journal of Indonesian Orthopaedic & Traumatology*, 1(1), 54-61.
- Kusnezov N et al. (2015). Acute Limb Shortening for Major Near and Complete Upper Extremity Amputations with Associated Neurovascular Injury: A Review of the Literature. *Orthopaedic Surgery*, 7, 306–316.
- Fonseca H et al. (2013). Bone Quality: The Determinants of Bone Strength and Fragility. *Sports Medicine*, 1-17.
- Clarke B. (2008). Normal Bone Anatomy and Physiology. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 3, 131-139.
- Natalie A. Sims, Christina Vrahnas. (2014). Regulation of cortical and trabecular bone mass by communication between osteoblasts, osteocytes and osteoclasts. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 7.

- KelseyMillonigDPM, MPH ByronHutchinsonDPMb. (Volume 38, Issue 1, January 2021, Pages 111-116). Management of Osseous Defects in the Tibia: Utilization of External Fixation, Distraction Osteogenesis, and Bone Transport. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*.
- Khaleel A et al. (2001). Bone transport. *Current Orthopaedics*(19), 229-237.
- Yushan M et al. (2020). Bifocal or Trifocal (Double-Level) Bone Transport Using Unilateral Rail System in the Treatment of Large Tibial Defects Caused by Infection: A Retrospective Study. *Orthopaedic Surgery*, 12, 184–193.
- Li R et al. (2020). Bone Transport for Treatment of Traumatic Composite Tibial Bone and Soft Tissue Defects: Any Specific Needs besides the Ilizarov Technique? *BioMed Research International*, 13.
- Ugalde C et al. (2012). Transporte óseo. *Revista de Medicina Legal de Costa Rica*, 11(1), 53-59.
- Rose RE. (diciembre de 2002). The Ilizarov technique in the treatment of tibial bone defects. Case reports and review of the literature. *West Indian Medicine Journal*, 51(4), 263-267.
- Watson T. (2006). Distraction Osteogenesis. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 14(10), 168- 174.
- Peng Y et al. (2015). A Systematic Review and Meta-Analysis of Ilizarov Methods in the Treatment of Infected Nonunion of Tibia and Femur. *Plos One*, 12.
- Omer A et al. (2018). Bone Transport of Tibia. *European Scientific Journal*, 14(15), 12-24.
- Sigmund I et al. (2020). Comparison of Ilizarov Bifocal, Acute Shortening and Relengthening with Bone Transport in the Treatment of Infected, Segmental Defects of the Tibia. *Journal of Clinical Medicine*, 9, 12.
- Magadum M et al. (2006). Acute compression and lengthening by the Ilizarov technique for infected nonunion of the tibia with large bone defects. *Journal of Orthopaedic Surgery*, 14(3), 273-279.

- Liu Y et al. (2020). Complications of bone transport technique using the Ilizarov method in the lower extremity: a retrospective analysis of 282 consecutive cases over 10 years. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 354-366.
- Norhaiza S et al. (2014). Ascorbic acid induces osteoblast differentiation of human suspension mononuclear cells. *Cytotherapy*, 16(5), 674-682 .
- Aghajanian P et al. (2015). The Roles and Mechanisms of Actions of Vitamin C in Bone: New Developments. *J Bone Miner Res*, 30(11): 1945–1955.
- Sarizoen E et al. (2002). The Effects of Vitamins E and C on Fracture Healing in Rats. *The Journal of International Medical Research*, 30, 309 – 313.
- Hart A. (2015). The Role of Vitamin C in Orthopedic Trauma and Bone Health. *The American Journal of Orthopedics*, 306-312.
- Fischer V et al. (2018). Calcium and vitamin D in bone fracture healing and post-traumatic bone turnover. *European Cells and Materials*, 35(1), 365-385.
- Aghajanian P et al. (2016). The Roles and Mechanisms of Actions of Vitamin C in Bone: New Developments. *Journal of Bone Mineral Research*, 30(11), 1945–1955.
- Flores-Espinosa JA et al. (2011). Distracción osteogénica bifocal como alternativa para reconstrucción mandibular. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 49(6), 659-664.
- Paley D. (1989). Bone transport: The Ilizarov treatment for bone defects. *Techniques Orthopaedics*, 4(3), 80-93.
- Kähler U. (2019). Plate-assisted Bone Segment Transport With Motorized Lengthening Nails and Locking Plates: A Technique to Treat Femoral and Tibial Bone Defects. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 3(8), 14.
- DeCoster T, Gehlert R, Mikola E, Pirela-Cruz M. (enero de 2004). Management of Posttraumatic Segmental Bone Defects. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 12(1), 28-38.

- Aronson J. (agosto de 1997). Limb-Lengthening, Skeletal Reconstruction, and Bone Transport with the Ilizarov Method. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 79(8), 1243-58.
- Watson J T, Anders M, Moed B. (1995). Management strategies for bone loss in tibial shaft fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 315, 138-152.
- Green S. (abril de 1994). Skeletal Defects A Comparison of Bone Grafting and Bone Transport for Segmental Skeletal Defects. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 301, 111-117.
- Cierny G, Z. K. (1994). Segmental Tibial Defects Comparing Conventional and Ilizarov Methodologies, *Clinical Orthopaedics and Related Research*. *Clinical Orthopaedics and Related Research: April 1994 - Volume 301 - Issue - p 118-123*, 301, 118-123.
- Fahad S, Habib AA, Awais MB, Umer M, Rashid HU. (2019). Infected Non-union of Tibia Treated with Ilizarov External Fixator: Our Experience. *Malaysian Orthopaedic Journal*, 13(1).
- Farmanullah, Khan MS, Awais SM. . (s.f.). Evaluation of management of tibial non-union defect with Ilizarov fixator. . *Journal of Ayub Medical College*, 19(3), 34-36.
- Millonig F, H. B. (6 de 2021). Management of Osseous Defects in the Tibia: Utilization of External Fixation, Distraction Osteogenesis, and Bone Transport. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 38(1), 111-116.
- Frost H. (2004). A 2003 Update of Bone Physiology and Wolff's Law for Clinicians. *Angle Orthodontist*, 74(1), 13.
- Bisaccia M, Rinonapoli R, Meccariello L, Caraffa A, Cukierman B, Ribes J. (2017). The Challenges of Monoaxial Bone Transport in Orthopedics and Traumatology. *MEDSPORTPRESS*, 19(4), 373-378.