CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

E uso de a um n o y sus a eac ones hasta med ados del s glo XX se im tó pr n pa mente a a producc n de artefactos decorat vos y utens os de coc na La expans ón e n m a produ t de a postguerra en os años 50 s h zo crecer en gran med da a ndustr a de a um n mas tarde en os 70 s a cris s de petró eo mot vó e desarrol o de nuevas te n og as e nom zadoras de combust b e En a ndustr a de transporte aumentó tab emente e uso de a eac ones de a um n o deb do a que la combinación de bajo peso y buenas pr p edades mecán cas y térm cas h eron de estos materia es a mejor opc ón para la ust tu n de tr s mater a es más pesados como e h erro y e acero

Es en est s añ s en os que se da un amp o desarro o de as a eac ones de a um n o en a ndustr a aérea y aut m tr z Se destacan as a eac ones de t po a um n o s c o a um n o-bre a um n magnes a um n o s c o magnes o y as a um n o s c o-cobre en a producc ón de m n b oques de c mbust ón nterna cabezas de enfriam ento de c ndros cam sas para mot re y p t nes para motores d ese

na a ea n que destaca por su gran desarro o tecno óg co dentro de as a eac ones a m n bre es a 319 esto se debe pr nc pa mente a as buenas prop edades mecan as q e se pueden a canzar con esta a eac ón no obstante que a mayor parte de a mater a p ma que se ut iza para obtener a prov ene de mater a rec c ado s end éste un factor q e d m nuye sens b emente e prec o de product fina

La materia prima tan heterogénea que se tiene para la producción de la aleación 319 provoca que aumente el contenido de distintos elementos considerados impurezas entre los que destacan el hierro manganeso cromo magnesio y zinc De estos elementos el que tiene mayor influencia negativa en las propiedades mecánicas es el hierro el cual al precipitarse junto con otros elementos en forma de fases frágiles disminuye la elongación y la resistencia a la tensión de materiales al funcionar como concentradores de esfuerzos Estas fases influyen también en otros problemas como la porosidad por rechupes[4]

Un ejemplo de lo anterior lo expone Otte[4] al encontrar en su trabajo que el incremento de contenido de Fe de 0 1 a 1 0 % en aleaciones de tipo 380 provoca que la porosidad aumente un 30 él relacionó el aumento en la porosidad a posibles cambios en la secuencia de solidificación de las distintas fases presentes en la aleación

La precipitación de fases ricas en Fe aun a bajas concentraciones se hace posible por la baja solubilidad que presenta este elemento dentro de aluminio siendo ésta de 0 05 % a 66 C y este valor sé reduce conforme disminuye la temperatura o se encuentra en presencia de tres elementos con los cuales pueda formar compuestos como el S Mn Cu y Cr[4] Otro factor que juega un papel muy importante para la precipitación de fases ricas en Fe es la alta segregación que se da durante el proceso de solidificación dendrítica de la aleación esta segregación permite la acumulación de grandes cantidades de soluto lo que permite la formación de fases ricas en Fe extremadamente frágiles con distintas estructuras y morfologías Las fases que se presentan durante la solidificación de una aleación del tipo 319 se presentan en la Tabla 1 1

Reacción	Reacción	Temperatura sugerida (°C)
1	Desarrollo de la red dendrítica de Al primario	609
2a	$L \rightarrow Al + Al_{15}MnFe_3Si_2$	590
2b	$L \rightarrow Al + Al_5FeSi + Al_{15}MnFe_3Si_2$	590
3	$L \rightarrow Al + Si + Al_5FeSi$	575
4	$L \rightarrow Al + Al_2Cu + Si + Al_5FeSi$	525
5	$L \rightarrow Al + Al_2Cu + Si + Al_5Mg_8Cu_2Si_6$	507

Tabla 1.1. Reacciones durante la solidificación de una aleación de aluminio de tipo 319

Dentro de esta a eac ón as dos fases ricas en Fe que se presentan más frecuentemente son a La fase β-A FeS que presenta una morfo og a de hojuelas (a cua se observa morfo óg camente en dos d mens ones como agujas con una estructura monocl n ca Figura 1 1a b La fase ɹ-A MnFe S, que presenta una morfo og a más compacta escritura china n una estructura cub ca F gura 1 1b no obstante que esta estructura es más dura no t ene deb d a su forma a m sma tendenc a a in ciar fracturas como a estructura β A FeSi

Figura 1.1. Morfo og as comunes de as fases ricas en h erro a estructura (-Al FeSi b estru tura A MnFe S

E nten do de Fe en a a eac ón tiene gran mportancia ya que a aumentar éste el porcenta e de as fases r cas en Fe t ende a aumentar se ha reportado en traba os como el de Gu tafss n que a aumentar e nten d de Fe a ong tud de a fase (aumenta as como la g tud de s brazos de a fase ɹ este a argam ento va en detrimento de as prop edades mecán cas P r su parte Mackay encontró que a aumentar e conten do de Fe a temperatura de f rma n de a fase A FeS en a eac ones A S con ba o conten do de Mn t ende a n rementarse

L s e ement s de a eac ón tamb én uega un pape mportante en a m croestructura y por ende en as pr p edades de a a ea n ya que c ertos e ement s como e Cr Mo Co y s bre 'od e Mn t enen gran nfluenc a s bre a morfo og a resu tante de as fases r cas en Fe ha end pred m nante a f rmac ón de a fase ɹ-A MnFe S por ta razón es comun en ntrar que en as fund c ones se trate de mantener una re ac ón de 2 1 o mayores entre Fe y M s empre y ^uando e contenido m n mo de Mn sea supenor a 0 4

Tamb én se han encontrado en otras nvest gac ones como a que Samue [8] evó a cabo en a eac ones de t po 319 con bajo conten do de Mn que la presenc a de Mg t ende a transformar as agu as [-A FeS a fases A $_8$Mg FeS que t ene forma de escntura china y que la presenc a de Sr t ende a d so ver la fase β-A FeS en la matriz de a um n o sin una transformac ón a a guna otra fase encontrando este nvest gador que 1 2 $_o$ de Mg tiene un efecto s m ar a de a comb nac ón de 0 5 de Mg + 0 03 de Sr tamb én encontró que el Sr no fav rece a nuc eac ón de as fases α A MnFe S en forma de odos o de estre a

Shabestar encontró tamb én que para as a eac ones de t po 413 e n ve ópt mo de Sr para m d f car as fases r cas en Fe es de 0 04-0 06 reduc endo e tamaño de las fases α-A MnFe S hasta en un 45 y fragmentando as agujas de β A FeS reduciendo de esta manera a ong tud promedio de estas fases hasta en un 50 Este nvest gador encontró tamb én que e efecto de Sr se ve nvert do a ba as ve oc dades de so d ficac ón propic ando una ag merac ón y a argam ento de as fases r cas en Fe

m se acaba de menc onar a c nét ca uega un pape muy mportante ya que al var ar a ve dad de so d f cac ón se presentarán camb os en as temperaturas de nucleación as m en a morfo og a de as d st ntas fases Por ejemp o a aumentar a ve oc dad de d f ca ón a fase ι-A MnFe S t ende a crecer más fác mente que a fase [-Al FeSι en as a ea nes de a to conten do de Mn [4] Ba erud re ac ona este fenómeno con a fac ıdad que t ene a fase cub ca ι para crecer en comparac ón con a fase monoc n ca β

P r e contrar o Anantha encontró en sus estud os que e dom n o en a crista zac ón de a fase en a eac ones con Mn só o se presenta a ba as y moderadas ve oc dades de s d f ca ón y que a a tas ve oc dades se encuentra a presenc a de ambas fases ι y [

A este respe t Gustafsson en ontró en sus estud os de a eac ones A S Mg que a aumentar a ve dad de s d ficac ón a ong tud de as ho ue as de A FeS d sm nuye a gua q e s brazos de a fase A MnFe S escr tura ch na

Wang en sus estud s de a eac ones A S para p ezas de nyecc ón de a eac ones A - n ye que a morf og a de as fases r cas en Fe depende de a ve oc dad de so d ficac ón y de nten do de Cr ya que este e emento t ende a fac tar a formac ón de a fase A MnFe S en f rma de odo o estre a

Gauth er en sus estud os sobre tratam entos térm cos de a eac ones de t po 319 2 encontró que deb d a a presenc a de fases A Cu de bajo punto de fusión 515 a 540 C las temperaturas de so u ón se deben mantener dentro de un nterva o muy estrecho Tamb én en ntró que e me r tratam ento de so uc ón era de 8 hrs a 515 C ya que a mayores temperaturas a fus ón parc a de as Fases A Cu provocan a aparición de poros dad por rechupes después de temp e Un tratam ento térm co de so ub zado a ternat vo propuesto por este autor es ca entar por un orto per odo de t empo a 540 C para as esfero d zar las partículas de S y d so ver una parte s gn f cat va de Cu segu do esto de un ento enfr am ento hasta 515 C durante e cua as fases A Cu so d ficarán de a manera usua para fina mente templar en agua Este proces presenta me res prop edades que as obtenidas med ante tratamientos a ba as temperaturas durante argos per od s de t empo

P r o anter or e pr mer ob et vo de este trabajo es estud ar los efectos m r e tructura es comb nad s que tendr an e redu r e conten do de Fe en la a eac ón 319 de u nten d hab tua de 0 6 0 7 a 0 3 con camb os en a ve oc dad de so d ficación y amb s en a mpos c n qu m ca Sr y T E segundo ob etivo es cuant f car os cambios m roestr ctura es sufr dos por as fases r cas en Cu de as muestras antes mencionadas sin tratam ent térm co y después de ser so ub zadas a d st ntas temperaturas

Dentr de a metod og a segu da se obtuv eron muestras de meta en cond c ones de p anta en as que se var a compos c ón qu m ca para dos ve oc dad de so d ficac ón d stintas é tas fuer n bten das med ante e uso de dos t pos de mo des uno de arena y e otro metá ico Las muestras bten das fuer n rtadas y somet das a tratam entos térm cos de so ub zado por n per od de 6 h ras en d hos tratam entos se var ó a temperatura 460 480 y 500 C tras un enfr am ent ráp d en agua a temperatura amb ente as muestras fueron sobreenve ecidas a 24 por un per od de 3 hrs Las muestras fuer n preparadas meta ográficamente para ser e t d adas ba m rosc p a pt ca y aná s s de magen con o que se pretende cuant ficar os camb s m roestru tura es sufr d s por a a ea n ba as d st ntas cond c ones de vac ado mpo nes y tratam ent s térm c s

Se p antea a h pótes s de que e camb o en e conten do de Fe tenderá a favorecer a d n n de tamaño de as fases r cas en Fe aunado a este efecto se espera una mayor d m nu n en a ng tud de estas part cu as en as muestras somet das a a tas ve oc dades de s d fica n Se espera tamb én que a cant dad de fases ícas en Cu A Cu a gua que su tama d sm n yan a d s verse más ráp do en a matriz conforme se ncrementa a perat ra de so b uzado para uego prec p tarse en forma de part c as más pequeñas

durante e sobreenbe ec do de materia ten endo como consecuenc a una mejora en las prop edades mecán cas reportadas en estas muestras [4]

CAPÍTULO 2

SOLIDIFICACIÓN

2.1. Introducción.

La may r parte de os mater a es t enen que pasar por un camb o de fase durante algun pa en su proceso de fabr ca ón Uno de las transformac ones más importantes es la t ans n de estado qu do al só do ya que todos los meta es tienen que sufrir esta tra sf rma ón para poder convert rse en un ob eto ut a este proceso se le conoce como d f ca n

Durante e pr eso de s d f cac ón conforme d sm nuye a temperatura del qu do a energ a nterna de s át mos va s end cada vez menor y por o tanto as fuerzas de atracc ón r g nan e agrupam ento de os átomos hasta que f na mente e qu do se so d fica La may r a de s mater a es a s d f car exper mentan una contracc ón de vo umen lo que ind ca na separa n men r entre s át m s en e estado só do En este estado os átomos no permane en en repos s no que v bran a rededor de sus pos c ones de equ br o dando ugar a a d po n ordenada de as estructuras r sta nas

2.2. Mecanismos de nucleación.

Aunq e en e estad qu do s átomos no t enen una d stribu n ordenada defin da p ede rnr que en un nstante ua qu era a gunos de e s se agrupen ocupando pos c ones muy s m a es a as que es corresponde en a red espa a que se forma a so d f car e qu do F g ra 2 1

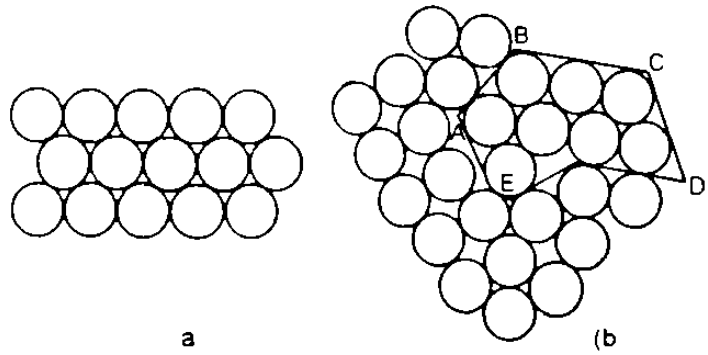


Figura 2 1. Representa ón esquemática de una estructura a crista na y b) de un qu d E área ABCDE presenta a m sma ordenac ón en e iqu do y en el cristal [15]

Estos c ng omerados atóm cos no son permanentes s no que se forman y destruyen ráp damente su durac ón depende de a temperatura de med o y de su tamaño de tal modo que cuant mayor es a temperatura mayor es a energ a cinética de los átomos y más corta la v da de os grup s Los cong omerados pequeños son muy nestab es porque están formados por un numer pequeño de átomos y a pérd da de uno de e os puede ocas onar su destru n A med da que d sm nuye a temperatura de qu do os átomos p erden libertad de m v m ent o que da ugar a un aumento de la v da de cong omerado coex st endo al m smo t emp un umero mayor de e os este aumento en a v da de cong omerado está acompañado de un aument gradua de su tamaño si esta part cu a a canza un tamaño crit co será ns derada un nuc eo a part r de cua crecerán os cr sta es metál cos

Ex sten d s t pos de procesos de nuc eac ón

a N ea n h mogénea En este proceso a nueva fase só da se forma un formemente en tod e v umen de a fase qu da madre

b N ea n heterogénea En este proceso a nueva fase só da no se forma en toda la fase madre s no que busca s t os preferen a es para so d f car

2 2 1 Nucleación homogénea.

S se ns dera e proces de so d ficac ón dentro de a teor a c ás ca de a nuc eac ón de V mer y Weber [6] se podr a cons derar só o e camb o de energ a bre durante a so d fica n

$$\Delta G_V \quad G_s \quad G \qquad [2\ 1]$$

donde ΔG_v es a energ a bre de vo umen G es a energ a bre de só do y G es a energ a bre de qu do en esta ecuac ón e cambio de a energ a bre de vo umen durante la s id f ca ón se vue ve negativo ya que a energ a bre de só do es menor a a de liqu do nf rme d sm nuye a temperatura a part r de punto de fus ón Esto se puede observar en la F gura 2 2 en a que se gráfica a energ a bre de vo umen como una func ón de a temperatura en ambas fases A a temperatura de so d ficac ón ambas fases deben tener a m sma energ a bre ya que están en equ br termod nám co a esta temperatura Supóngase que e quido se enf a por deba de su temperatura de fus ón s n s d f car a este nterva o de temperatura se e ama sobreenfr am ent

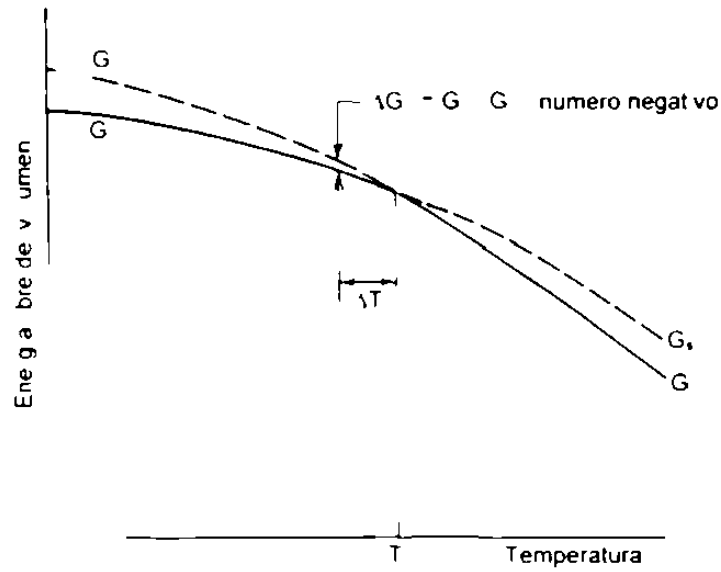


Figura 2 2. Dependenc a de a temperatura en a energ a bre de vo umen de as fases da y qu da

e ns derará pr mer a nu eac ón homogénea En este aso e só do emp eza a f ma se m eg nes muy pequeñas a través de vo umen de qu do Estas pequeñas part as se amarán nu e s y se cons derará que t enen forma esfér ca Cuando estos n e s se f rman pr mero son muy pequeñ s probab emente de orden de 10 A en d ámetro P r n g ente su re a n superfi e a vo umen es muy a ta C mo habrá una energ a bre a ada n a f rma n de a superfi e de nuc eo esta energ a superfi a actuará como una barrera para a f rma n de nuc eos pequeños Para tomar en cuenta este efecto superfic a se e r be e camb de energ a bre para f rmar un nu eo como

$$\Delta G \quad \frac{4}{3} r \quad \Delta G_v + 4\pi r \qquad [2\ 2]$$

d nde a energ a bre superfic a se ha tomado s mp emente como a tens ón superfic a Lo anter or es correct en mater a es puros pero ntroduce un pequeño error en as a eac ones el cua n se cons derará ΔG_v es e camb o de energ a b e de vo umen definido en a F gura 2 2 Los dos térm nos de a ecuac ón [2 2] se graf can en a F gura 2 3 mostrando el térm no energ a bre de vo umen negat vo que hace que se rea ce e proceso y e térm no energ a l bre superfi a pos t vo que o nh be y se ve que e camb o de energ a bre total es máxima en r* La F gura 2 3 da e camb o de energ a bre tota para un proceso en el que un numero n de át m s de qu do se comb nan entre s para dar un só do de tamaño r Se supone que el pr eso de nu eac ón rea no se presenta con este t po de nuc eac ón a gran escala donde n át mos de qu do se vue ven repent namente só dos Se cree que ex ste una d stribución de tamañ s de pequeños ag merados de átom s en el qu do en cua qu er t empo y estos ag merados se cons deran omo nuc e s potenc a es Debido a fluctuac ones térm cas dichos ag omerad s ganan y p erden átomos cont nuamente E fenómeno de nuc eación se presenta uando uno de estos ag omerados gana más át mos de os que p erde

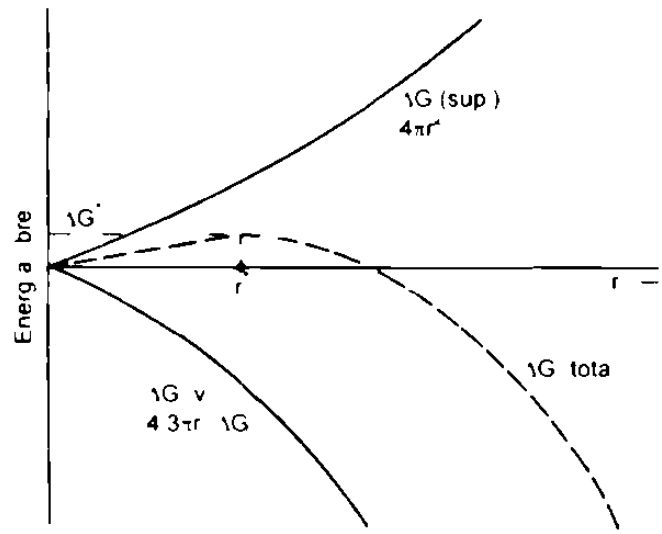


Figura 2 3. Energ a bre de formac ón de un nuc eo como una func ón de su rad o

S e camb de ene g a bre para esta reacc ón es negat vo se favorece entonces e fen men de nuc eac ón A bservar a F gura 2 3 se puede ver que para todos os va ores de r r* esta rea ón t ene un camb o negat vo de energ a bre es dec r amba de r* e rec m ent de un nu eo d sm nuye a energ a bre P r cons gu ente r* es un rad o cr t co y su va r se determ na der vando a ecuación [2 2]

$$r^* \quad \frac{2}{\Delta G_v} \qquad [2\ 3]$$

E cambio de energía libre para formar un núcleo de tamaño crítico ΔG^* se encuentra sustituyendo en la ecuación [2 2]

$$\Delta G^* \quad \frac{16\pi}{3\ \Delta\ _v{}^2} \qquad [2\ 4]$$

La nucleación es el resultado de la formación de núcleos con un tamaño que los hace estables para el crecimiento de la nueva fase formándose a partir de pequeños aglomerados atómicos en la matriz líquida

2 2 2 Nucleación heterogénea.

Quedará claro de análisis anteriores que la razón para que no haya nucleación inmediatamente después de alcanzar la temperatura de transformación es la barrera presentada por los requerimientos de energía libre superficial de los núcleos Por consiguiente los sistemas físicos que sufren transformaciones de fase intentan reducir esta barrera de energía libre superficial a hacer que la nucleación se presente sobre una intercara preexistente paredes de molde y partículas suspendidas en el metal líquido De esta forma la intercara preexistente se borra y entonces el cambio neto de energía libre superficial puede reducirse un poco Este proceso se ilustra considerando la formación de una nueva fase fuera de la fase en la pared del recipiente La Figura 2 4a muestra la nueva fase formándose como un casquete esférico sobre la pared es decir la fase es una porción de la esfera que tiene radio r una vista superior de la Figura 2 4a mostraría la fase β como un círculo con radio proyectado R Para obtener el cambio de energía libre superficial producido por la formación de esta fase se tiene la energía libre superficial igual a la tensión superficial y se tiene

$$G_{sup} \quad |A \qquad A_{w\ w} \quad A_{w\ w} \qquad [2\ 5]$$

donde A es el área de la intercara y A_{w} es el área de la intercara w Nótese que se debe restar la energía libre superficial de la interfase w que fue borrada cuando se formó la fase y el área de esta interfase w borrada es exactamente A_{w} Para proseguir se tiene el balance de fuerzas de tensión superficial en el borde de las fases como se muestra en la Figura 2 4b

$$w \quad w + \quad s \qquad [2\ 6]$$

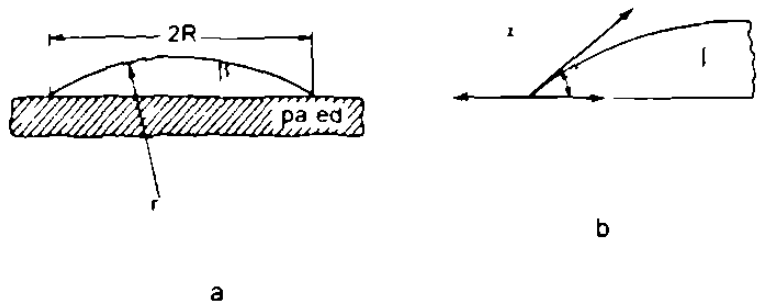


Figura 2.4. a Geometr a de casquete esfér co b D agrama de tens ón superf c al en el borde de casquete [1]

Sea S cos y hac endo A_{lw} πR se obt ene a comb nar las ecuaciones 2 5 y 2 6

$$\lambda G\ sup\ )\ \ A \qquad \pi R^2 (\quad S) \qquad [2\ 7]$$

La expres ón para e camb o tota de energ a bre en a formac ón de nuc eo del casq ete esfér o se escr be como

$$\lambda \quad \lambda G(v\ \ umen + \lambda G(sup\ )$$

$$V\ \lambda G\ + (A \quad \pi R^2 S) \qquad [2\ 8]$$

Para amp ar esta ecua ón se neces tan as expres ones s gu entes de vo umen y e área de a superfi e de casquete esfér o

$$V \quad \pi r \quad \frac{2\ \ 3S +}{4}$$

$$A \quad 2\pi r^2 \ [1\ \ S \qquad [2\ 9]$$

$$R \quad r \quad sen$$

Sust tuye d en a ecuac ón [2 8] se obt ene

$$\Delta G = \pi r^3 \left[2 - \frac{3S + S}{4} \right] \Delta G_v + \left[2\pi r^2 (1 - S) - \pi r^2 \operatorname{sen}^2 \beta \right] \gamma \qquad [2.10]$$

Como seno es 1 - S^2 por álgebra se obtiene

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \left[2 - \frac{3S + S}{4} \right] \qquad [2.11]$$

Comparando este resultado con la ecuación [2.2] se ve que la única diferencia es el término entre corchetes del lado derecho. Para obtener el valor crítico de r^* se deriva y en forma similar a los resultados de la ecuación [2.2] se obtiene

$$r^* = \frac{2}{\Delta G_v} \qquad [2.12]$$

Comparando este resultado con la ecuación [2.3] se ve que el radio de curvatura de la cubierta esférica es idéntico al radio de la esfera que se obtendría por nucleación homogénea. Entonces comparando las ecuaciones [2.2] y [2.11] resulta evidente que el ΔG^* para la nucleación heterogénea será idéntico al de la nucleación homogénea excepto por el término no de corchetes que implica S de la ecuación [2.11]

$$\Delta G^*_{het} = \Delta G^*_{hom} \left[\frac{2 - 3S + S}{4} \right] \qquad [2.13]$$

el término entre corchetes varía desde 0 hasta 1 conforme el ángulo diedro de la Figura 2.4b varía desde 0 hasta 180. Desde luego $\Delta G^*_{het} < \Delta G^*_{hom}$ lo cual demuestra que para la nucleación heterogénea se requiere menor energía y por consiguiente se presenta con mayor facilidad. Este resultado puede verse también si se observa que

$$R^* = \frac{2}{\Delta G_v} \operatorname{sen} \beta = r^* \operatorname{sen} \beta \qquad [2.14]$$

Cuando disminuye el valor de R^* se reduce también lo cual indica que el volumen del núcleo heterogéneo se hará más y más pequeño y por lo tanto requerirá cada vez menos átomos para su formación. En $\beta = 0$ el volumen se hace cero de tal manera que se espera que el proceso ocurra a nucleación sin que se requiera ningún sobreenfriamiento.

2 2.2.1. Nucleación secundaria.

Durante e proceso de nuc eac ón pueden crecer nuevos cnsta es después de que los cr sta es pr mar os se han formado y están en su proceso de crec m ento esto se debe a que en a nterfase só do qu do e cnsta crece a una temperatura T menor a a temperatura de equ br o T, por o que s e meta qu do cercano a as nterfases es sobreenfr ado hasta T y si esta temperatura es menor a a temperatura de nuc eac ón homogénea de qu do se produc rá a nuc eac ón de nuevos cnsta es y s esta temperatura es mayor a la temperatura de nuc eac ón homogénea se presentará e crec m ento de cr sta es co umnares en e mo de F gura 2 5

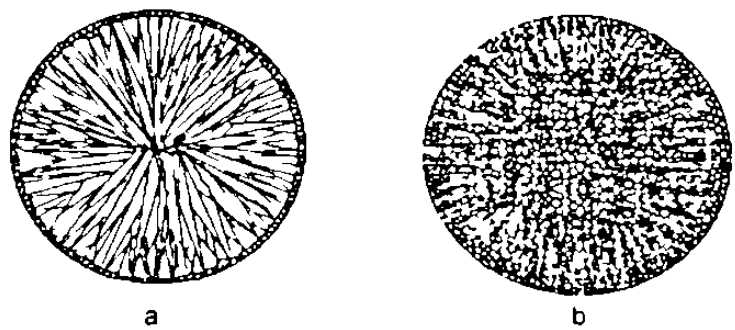


Figura 2.5. En a se muestra una estructura cr sta na s n nu eac ón nter or en b a estructura presenta nu ea ón ntenor[1]

2 2.3 Sobreenfriamiento.

En s punt s anter ores se v que os meta es se s breenfr an deb do a que a forma n de a superfic e de nuc eo a tua como una barrera para a nuc eac ón Cuanto mayor es e s breenfr am ent mayor es a energ a bre ΔG_v d spon b e para forzar a transformac ón segun puede verse gráf camente en a F gura 2 2 A a temperatura de so d f ca ón ΔG_v es exa tamente ero as que se t ene

$$G_V \qquad \Delta H \quad T \qquad [2\ 15]$$

donde e sub nd ce s se ref ere a a temperatura de so d f cac ón S as capac dades ca or ficas de meta qu do y de só do son gua es $\Delta C_P = 0$ entonces de la termod nám ca se sabe que s camb os de enta p a para a so d ficación son ndepend entes de a temperatura Como e emp o e va or promed o para a so d ficac ón de Cu Fe Sn Pb N y Al es so amente de

3 6 De aqu que en una buena aprox mac ón se pueda tomar ΔH y ΔS como constantes con respect a a temperatura como ΔH_s y ΔS_s

$$\Delta G_V \; T \quad \Delta H \quad T \Delta S \qquad [2\ 16]$$

mb nand as ecua nes [2 15] y [2 16] se t ene

$$\Delta \; {}_v \quad \Delta H \; \frac{\Delta T}{T_s} \quad S_s \; \Delta T \qquad [2\ 17]$$

d nde ΔT T T E ta es una ecua n muy mportante ya que da una buena aproximación de a cant dad de energ a bre d sp n b e para ua qu er transformac ón de fase como una func ón de grad de s breenfr am ento Comb nand esta ecuac ón con a ecuac ón [2 3] se obt ene la dependen a de a temperatura de tamaño cr t co de nuc eo como

$$r^* \quad \frac{2 \; {}_{sl}}{\Delta S_f \; \Delta T} \qquad [2\ 18]$$

a ua se gráfica en a F gura 2 6 Este resu tado demuestra que conforme aumenta el breenfr am ento e tamañ de nuc eo cr t co d sm nuye Cons gu entemente la nuc eac ón se ha e más fá a ba as temperaturas deb do a que se requieren menos át mos para que se f me un nu e estab e

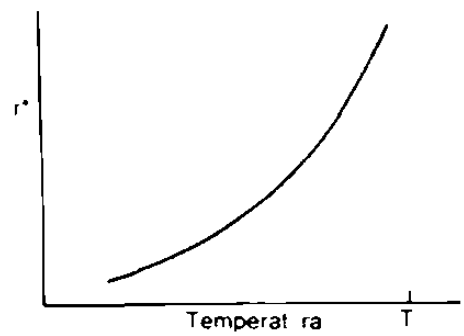


Figura 2 6 Var a n de radio de tamaño cr t co para a nuc eac ón con a temperatura

mo ya se menc onó anten rmente c a nuc eac ón homogénea e nuc eo se forma a part de un cong e ado de át mos en e qu do e c ng omerado de mayor tamaño se

tomará como de un rad o r a cua qu er temperatura A med da que d sm nuye a temperatura el va or de r se ncrementará deb do a a reducc ón de a energ a térm ca La forma de esta curva dependerá de a estructura de qu do pero cua tat vamente debe aparecer como en la F gura 2 7 La F gura 2 6 se ha superpuesto sobre esta gráf ca de r y se puede ver que a temperaturas por deba o de T_s-ΔT_H es e sobreenfr am ento requer do para a nuc eac ón h mogénea Ser a mpos b e sobreenfr ar por debajo de ΔT_H deb do a que la estructura de qu do proporc ona nuc eos mayores que r* bajo este grado de sobreenfnam ento Quedará c aro que a temperatura de nuc eac ón homogénea dependerá de a estructura de quido Y p r su parte a nuc eac ón heterogénea para evarse a cabo más fác mente como se mostró en e punt anter or requ ere de un menor sobreenfr am ento

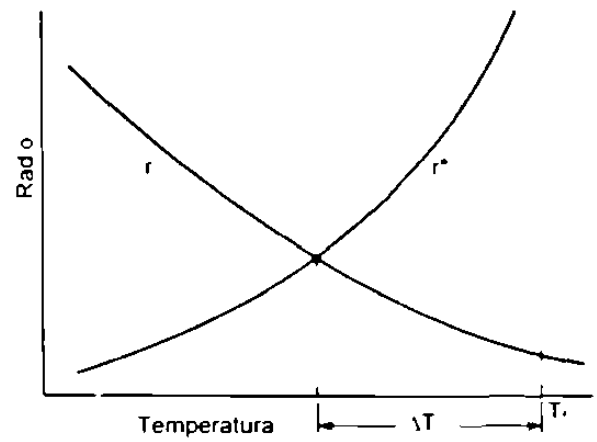


Figura 2.7. ustrac ón de a temperatura de nuc eac ón homogénea en un punto en d nde e rad o r t co es gua a rad o ag omerado de tamaño cr t co

2 2.4. Recalescencia.

En a F gura 2 8 se observa en a curva de enfr am ento para un meta puro para que a s d f cac n de meta se n c e t ene que s breenfr arse por debajo de a temperatura de fus ón y a canzar a temperatura de nuc eac ón Después de que ocurre a nuc eac ón a $T=T_{nucl}$ a temperatura sube ráp damente deb do a ca or atente desprend do durante a so d f cac ón A este proceso se e conoce como reca esenc a S n embargo esta e evac ón de temperatura se det ene abruptamente cuando se a canza a temperatura de punto de fus ón T_f Ya que no p ede haber sobreca entam ento a temperatura só o se puede e evar por enc ma de T_f s se funde e só do rec én formado E ca or atente por s m smo es nsufic ente para causar esta fus ón y as a e eva ón de a temperatura se det ene en T_f

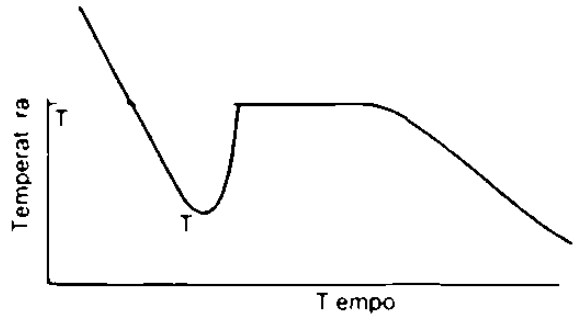


Figura 2.8. Curva t p ca de enfr am ento que ustra e sobreenfr am ento y la reca esen a de un meta pur

2 2 5. Proceso de fragmentación de los cristales.

Durante a s d f ca ón de s meta es es muy mun que haya mov m entos en e meta qu d pr vocad s p r flu tua nes de a temperatura a o arg de a cav dad de mo de Estos m v m ent s pueden dar ugar a desprend m ento o fragmentac ón de parte de os cr sta es ya ex stentes dand ugar a a f rma ón de nuevos cr sta es en e centr de m de Este proceso se puede evara a cabo en dos etapas

1 Fragmenta n pr mar a Este proceso se eva a cabo cuando as c rr entes convect vas dentro de meta qu d arrastran o rompen a os r sta es equ ax a es que se han formado erca de a pa ed de m de y os arrastran hac a e centro a p eza formado una estructura equ ax a a a arg de m de s est no su ede as se obtendrá una p eza con cr sta es eq ax a es en a pared de m de segu dos de cr sta es co umnares r entados hac a e e tr de mo de

2 Fragmenta ón secundar a Este proceso se presenta cuando se t ene a forma ón de n jev s cr sta es a part r de fragmentos de cnsta es ya ex stentes por ejemp brazos de as dendr tas p eden fund rse parc a mente por fluct ac ones de temperatura en e qu do undante y desprenderse de rest de a dendnta madre y f rmar nuevos r sta es

2.3 Solidificación de metales puros.

Es nve ente estud ar s meca smos de so d f cac ón en este t po de mater a es ya q e e hacerl fa tará a comprensión de s on p s de so id ficac ón en a eac ones

Ya que se ha formad e nuc eo en e mater a éste pros gue con su fase de rec m ento en a cua os átomos de a matr z qu da se unen a nuc eo estab e en una zona conoc da como zona nterfas a F gura 2 9

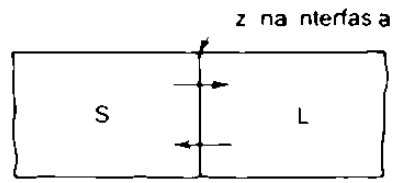


Figura 2.9. Reacc nes at m cas en a ntercara s d qu d [6]

2 3 1 Distribución de temperaturas en la intercara de solidificación.

Es muy mp rtante e t po de nter ara s d qu d presente en e mater a a que de ésta depende e t p de re m ent que se presentará en a s d fica ón Hay dos t pos de nter ara a de grad ente pos t v y a de grad ente negat vo

Para fa tar a exp ca n de este t p de ncept s se t mará como e emp o a s d f a n de una barra de meta que so d f ca en as nd nes de flu de ca or un d re na

1 ntercara de grad ente pos t v En este caso a temperatura de qu d es may r a a de s d y en e perf de temperaturas se en uentra que a temperatura sube nforme se a e a de a pared de m de debe de ha erse n tar que en a ntercara de qu do se t ene que s breenfr ar hasta a temperatura de nuc ea n para que se ogre a s d f cac ón a e te s breenfr am ento se e noce m ΔT_k F gura 2 1 a

2 ntercara de grad ente negat v En este cas a temperatura de qu do es menor a a de s d y en e perf de temperaturas se encuentra que a temperatura máx ma está en a ntercara a a temperatura de nu ea n y ba a nf rme avanza en e qu d o en e s d debe de ha erse n tar que en a ntercara e qu d se t ene que s breenfr ar para que se gre a s d fica ón F gura 2 10b

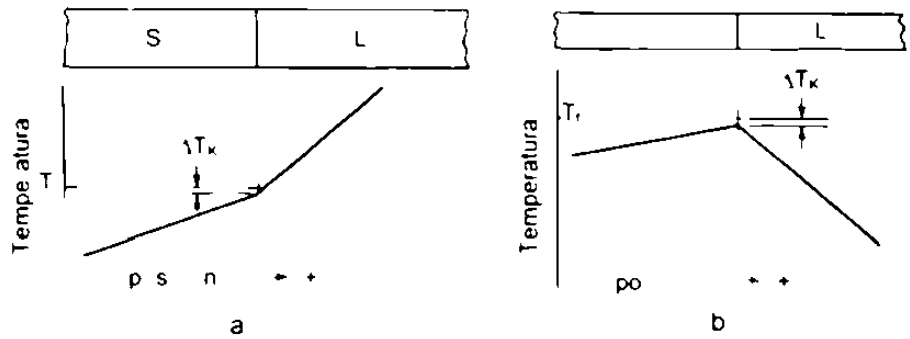


Figura 2.10. a Grad ente de temperaturas pos t v para una ntercara só do l qu do b) grad ente de temperatura negat v para una ntercara só d qu d

2 3.1.1. Morfologia de la intercara con gradiente positivo.

En este t po de ntercara se pueden tener d s t pos de m rf og a a fa etada y a no fa etada p anar m se muestran en a F gura 2 11a y b respe t vamente

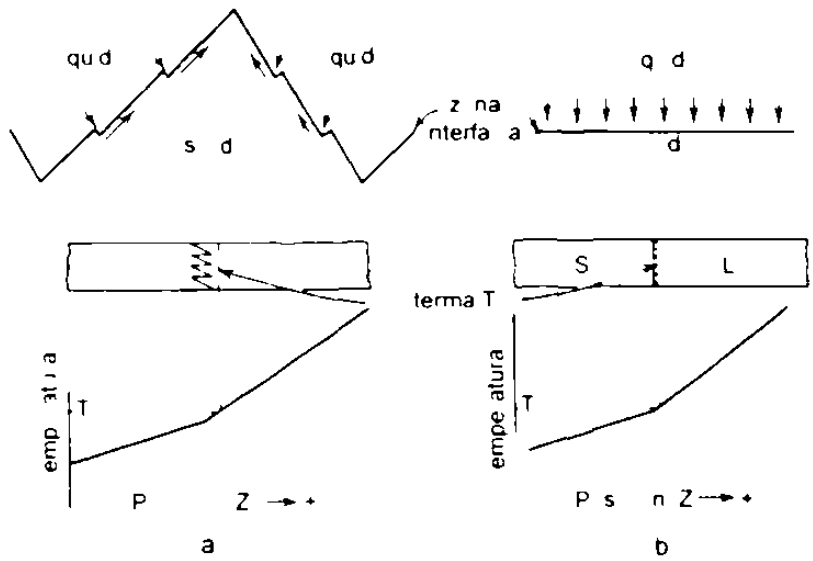


Figura 2 11. Las m rf og as de nter ara bservadas en meta es pur s n grad ente pos t v a ntercara fa etada b ntercara n fa etada p anar

De a uerdo a traba o de Ja ks n se sabe que ex ste una buena corre ac ón entre a entr p a de fus ón \S, de un mater a y e hecho de que so d f que con una ntercara facetada o c n una n facetada Tab a 2 1 Otra manera senc a de saber s un materia so d f ca de una u tra manera es por su sobreenfr am ento c nét c ya que en s mater a es con crec m ento fa etado se t ene un sobreenfr am ent de 1-2 C y en s que t enen crec m ento no facetado e s breenfr am ent es s o de 0 1-0 05 C Este sobreenfr am ento puede exp carse por a manera en que s át mos se unen a s do ya que en a ntercara fa etada se cree que crece a un rse es át m s en forma esca nada a arg de cada p ano facetado en e cua só o puede agregarse tro esca ón s e anter r ya re rr ó e e p an F gura 2 11a por su parte en a nter ara n fa etada s át m s e unen fá mente de manera a eat r a a a superfic e de s d F gura 2 11b

Mater a es	A R	M rf og as
Tod s s meta es regu are y a gun s gan s	<2	n faceta
em meta es y sem du t es B b a e	2 2 3 2	*Faceta bserva as
a may a de n rga →	5	*Fa ta b ervadas

Tabla 2.1. C rre a n de a m rf og a de a ntercara n a entr p a de fus ón \S, R nstante de s gases [6]

2 3 1.2. Morfología de la intercara con gradiente negativo.

Pr mer se ns derará e cas de s mater a es que son n fa etad s en os cua es de a ue d a que se mue tra en a F gura 2 12a se t ene un gran s breenfr am ento en e q d a a se amará S S T T Se ha determ nado exper menta mente que cuando d dZ a ntercara se vue ve nestab e y degenera en una ntercara arbórea amada dendr t a F gura 2 12b Para e caso en e que e s breenfr am ent n es muy grande se f rman estru turas ntermed as entre p anares y dendr t cas me r n das mo ce u ares

ah ra se ns deran s mater a es des r t s anter rmente como facetados se en ntr que e fa t r de que depende que s d fiq en en f rma dendr t ca o fa etada depende de e va r de \ R s mater a es fa etados de nterva nfer or de \S, R f rman dendntas m ent as que s de nterva o super r de va res de \S, R so d f can n m rf og as fa etadas

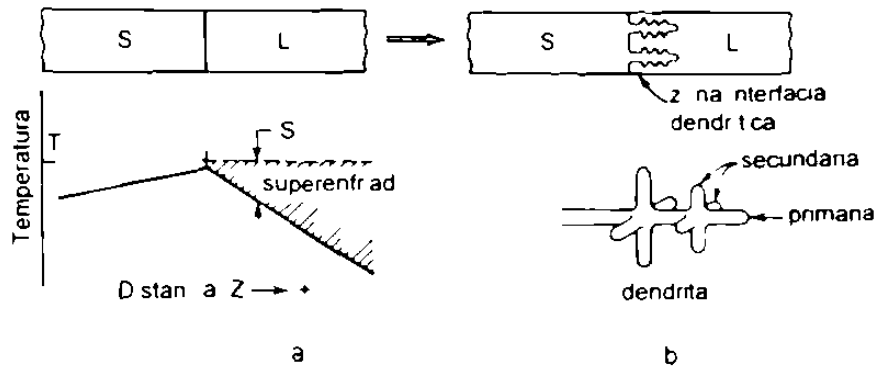


Figura 2.12. a Sobreenfr am ento con un grad ente de temperatura negat vo b m rf og a dendr t a resu tante

2.3.1.2.1. Crecimiento dendritico en materiales puros.

Es nteresante c n er s mecan sm s por s ua es es pos b e btener durante a so d f cac ón a amada m rf og a dendr t ca En e cas en s meta es puros se debe p mord a mente a heterogene dades en a temperatura de qu d s breenfr ado que se encuentra en as nmed ac nes de frente de s d f ca n

Deb do a esta heter gene dad de temperaturas cada vez que un punt en e frente de s d f ac ón se encuentre enfrente de é n un punt de qu do más sobreenfr ado que sus a reded res se produ rá un aumento en a ve dad de s d f ca n en esa área a cua trae m resu tado a formac n de una punta metá a Este rec m ent puntua está ac mpañado de de prend m ento de una c erta cant dad de ca r atente de fus ón e ua hace que e qu d adya ente a a punta se ca ente un poc e m nando a pos b dad de que crezcan más puntas en a vec ndad P r que a fina de uantas se obt ene un frente de so d f cac ón con un numer f n to de puntas d str bu das a nterva os regu ares de d stan a a estas puntas se es on ce c m s brazos pr mar s de as dendr tas F gura 2 13a

L eg de a f rma ón de est s pr mer s brazos en e frente de so d fica ón secc ón a a F gura 2 13b a temperatura es may r a a de a z na ntermed a a rededor de braz pr mar o sec n b b deb do a que e qu do ercano a a ntercara de s d f cac ón se ca enta por e ca r atente de fus ón desprend do en a ntercara por este m smo mot vo a temperatura de a z na a edaña a a punta de braz primano sec n -c se en uentra a una temperatura más e evada que a de a zona ntermed a b b Por o que a estar expuesta a zona ntermed a a un qu do más sobreenfr ado que e resto de braz pr n pa se genera e rec m ento de os braz s secundar os crec endo éstos a nterva s regu ares por un mecan smo s m ar a de los

brazos primarios Figura 2 13c E crec m ento de os brazos dendr t cos s gue hasta donde a geometria o perm te segu do de un engrosam ento de os brazos hasta un rse y formar un cristal cas homogéneo

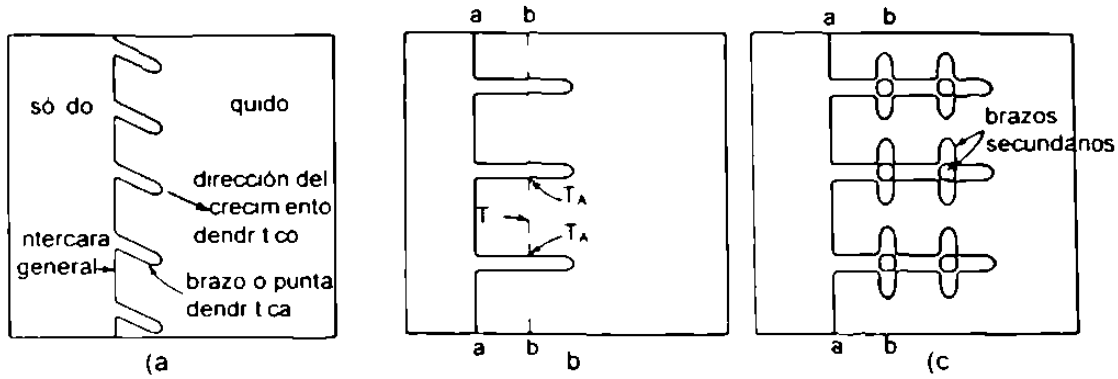


Figura 2.13. a Representac ón esquemát ca del primer paso en el crecimiento dendr tico b Los brazos dendr ticos secundar os se forman porq ie hay un descenso en el grad ente de temperatura en un punto ntermed o entre os brazos primarios c D agrama donde se muestra la formac ón de os brazos secundar os [9]

2.4. Solidificación en aleaciones.

Durante la so d ficac ón de a eac ones a compos n resu tante a través de só ido no es un forme o que se debe a un proceso de red str buc n de s uto amado segregac ón Esto se puede observar en e diagrama de fases de a F gura 2 14 en e cua para una a eac ón de composic ón X_0 conforme a temperatura d sm nuye a so d ficar a compos c ón de só ido aumenta en su conten do de so uto

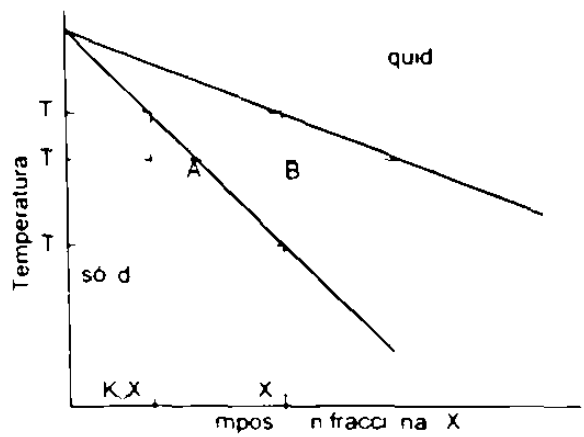


Figura 2.14 D agrama de fases de una a eac ón b nana

Normalmente el proceso de segregación a través de la pieza vaciada depende de factores como la difusión en el líquido cercano a la interfase, la convección en el líquido y el grado de acumulación de soluto cerca de la intercara. En la Figura 2.15 se ilustra la influencia de cada uno de estos factores en perfiles de segregación de barras solidificadas unidireccionalmente.

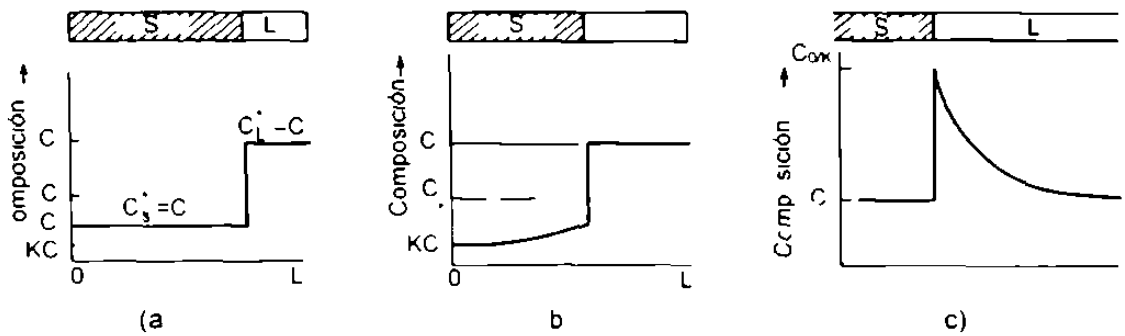


Figura 2.15. Perfiles de soluto para barras solidificadas desde el extremo izquierdo. a) Solidificación cerca de equilibrio con difusión completa en el sólido y el líquido. b) Solidificación sin difusión en el sólido y c) Solidificación con difusión limitada en el líquido y sin convección.[16-20]

2.4.1. Crecimiento dendrítico en aleaciones.

Como se observó en la Figura 2.15 durante la solidificación de aleaciones puede haber segregación de elementos lo que a su vez provoca cambios en el proceso de crecimiento de la fase sólida, esto se debe a que el cambio de composición química local frente a la intercara de solidificación (Figura 2.15c) provoca un fenómeno llamado sobreenfriamiento constitucional (Figura 1.16), el cual consiste en una disminución local de la temperatura de solidificación obteniendo de esta manera el sobreenfriamiento necesario para obtener estructuras celulares y dendríticas (Figura 1.17) sin la necesidad de tener un gradiente negativo en el frente de solidificación.

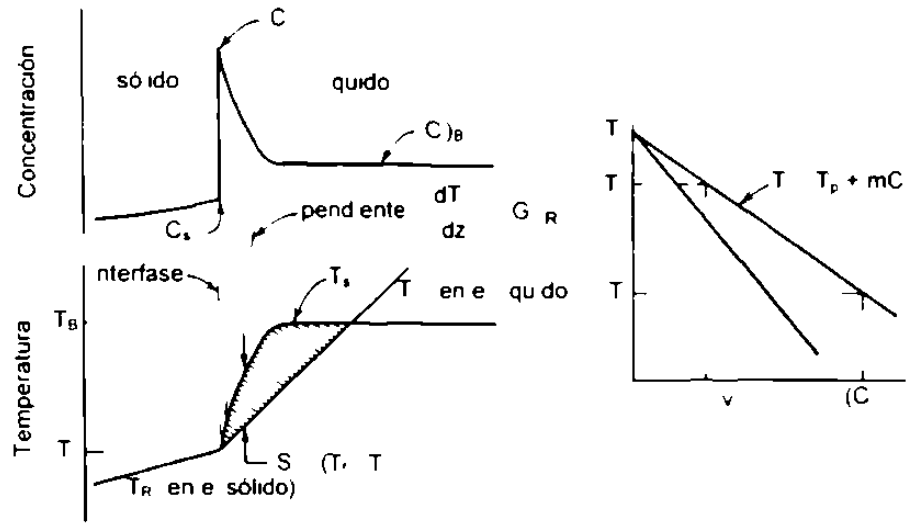


Figura 2.16. La región sombreada muestra el área sobreenfriada producida por la acumulación de soluto en la solidificación de una aleación de gradiente positivo [16]

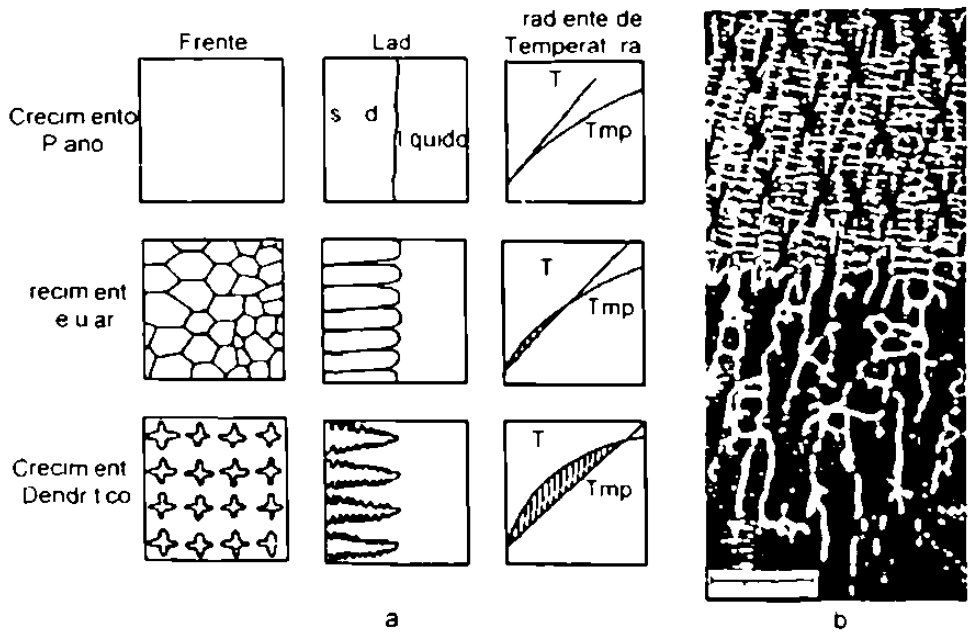


Figura 2.17. Transición de morfologías de crecimiento de planar a celular y posteriormente a dendrítica provocadas por el aumento de sobreenfriamiento constitucional a Esquemáticamente y b Físicamente para un acero de baja aleación [1]

2.4.2. Solidificación de mezclas eutécticas.

Muchas a eac ones t enen so ub dad só da m tada entre sus elementos lo que trae como consecuenc a que dentro de c ertos nterva os de compos ciones se presente la reacción eutéct ca en a cua se forman dos fases só das a part r de una fase quida Es importante el estud o de esta reacc ón ya que as dos a eac ones más mportantes desde el punto de v sta comerc al so d f can cerca de la compos c ón eutéct ca como e h erro vaciado y las aleaciones Al-S A gunos esquemas de estructuras eutéct cas se muestran en a Figura 2 18

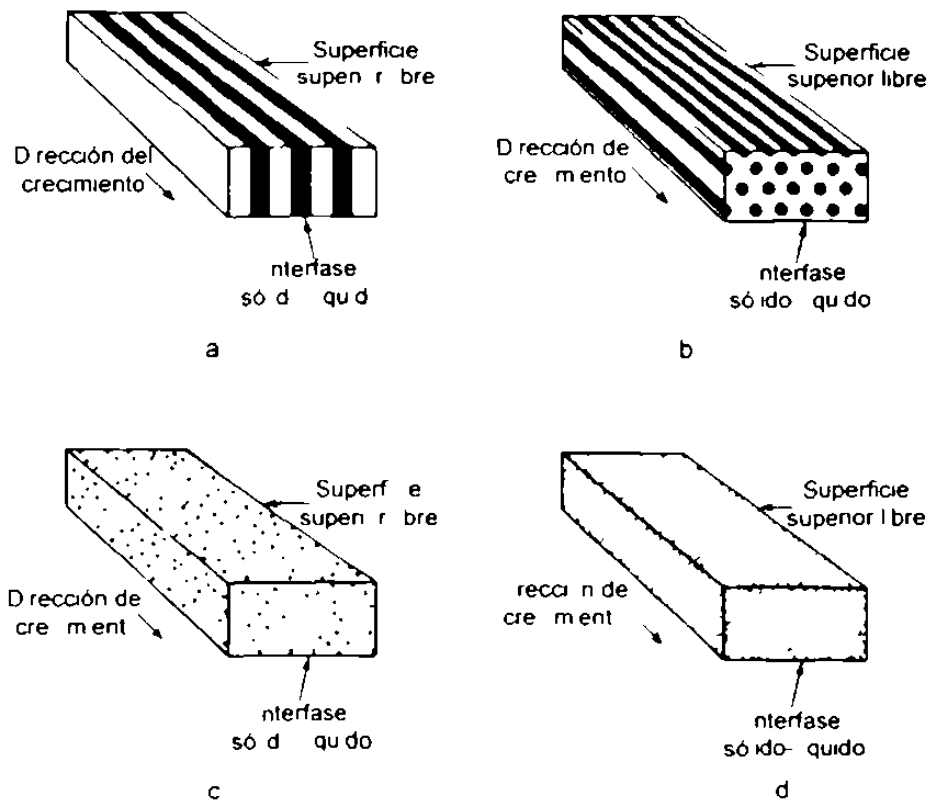


Figura 2.18. I ustrac ón esquemát ca de var as estructuras eutéct cas a Lam n as b) Var as c G obu ar d Ac cu ar[22]

Hay tres categor as dentro de as cua es se c as f can as m croestructuras de as fases eutéct cas

1 Regu ar Ex sten bás camente dos t pos de m c oestructuras regu ares as am nares y as fibrosas

2 Regu ar-comp ejo En a m croestructura regu ar comp ejo se observan dos reg ones una con un patrón regu ar repet t vo y a otra con or entac ón a eator a

3 Irregu ar Esta estructura presenta esenc a mente or entac ón a eatoria de as dos fases

En la Tab a 2 2 se puede observar que hay una buena corre ac ón entre el t po de m croestructura presente y e hecho de que as fases so d f quen formando intercaras facetadas o no facetadas

M r estructura	M rf og a de crec m ent de fases eutect cas	Ejemp s
1 Regu ar	N facetada/n facetada	Sn Pb Al Zn
(2 Regular-comp ejo	N facetada/facetada	Al S Sn Bi
(3 a) rregu ar	N facetada/facetada	Al S Fe C
b rregu ar	F acetada/facetada	

Tabla 2.2. Corre ac ón entre a morf g a euté t ca y a tendenc a las fases a facetarse [1]

La razón para la corre a ón de a Tab a 2 2 es probab emente el d ferente subenfr am ento c nét co que hay entre os mater a es facetados y os no facetados Cuando ambas fases son no facetadas as puntas de cada fase están dentro de casi 0 02 C de a temperatura eutéct ca y a ntercara só do qu d genera es esenc a mente sotérmica y por lo tanto p anar como se muestra en a F gura 2 19a S n embargo para e caso facetado-no facetado as puntas de a fase fa etada deben subenfriarse a rededor de 1 ó 2 C en comparac ón con 0 02 C para a fase no fa etada Cons gu entemente as puntas de a ntercara facetada deben crecer a temperaturas de 1 a 2 C más fr as que as puntas de a fase no facetada Con un grad ente de temperatura p s t v est s gn f ca que a fase facetada se rezagará geramente de a fase no facetada segun se muestra en a F gura 2 19b Aparentemente esta conf gurac ón es nestab e y a fase no facetada der sobrepasa en crec m ento a a fase facetada de una manera a eat r a Esto hace que a fase facetada se ram f que donde emp eza a ser sobrepasada y esta ram f cac n conduce a as m croestructuras rregu ares

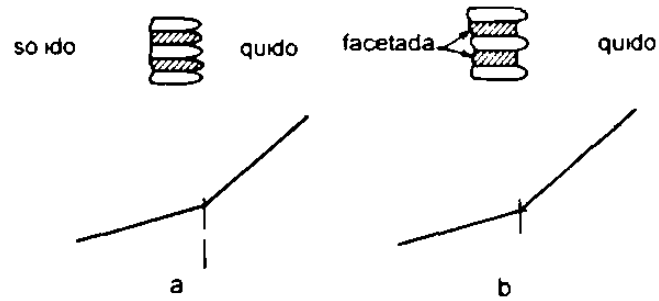


Figura 2.19. E perfi de ntercara para a eutéct cos no facetado-no facetado y b) eutécticos no facetado facetado [16]

2.5. Solidificación en la aleación A319.

En este punto se verá desde un punto de v sta más deta ado os factores que influyen en e proceso de so id f cac ón de una a eac ón A Si y su re ac ón con as prop edades f nales de la aleac ón

2.5.1 Refinamiento de grano.

Una de os pr nc pa es benefic s que se obt enen a tener un grano fino en una pieza vaciada y en espec a en las a eac ones A S es a d sm nuc ón de la tendenc a del agr etamiento en ca ente y a me ora en a d str buc n de a poros dad a lo argo de las piezas vac adas en cuanto a as prop edades mecán cas se bserva una me ora en la resistencia a la tens ón y a e ongac ón pero en s e efecto de ref nam ento de grano es secundar o ya que los factores pr nc pa es que mod f can as pr p edades mecán cas son a morfo og a de eutéctico y e espac am ento nterdendr t co secundar o Uno de os efectos adversos de refinam ento de grano es a d sm nuc ón en a flu dez de meta qu do

Los dos procesos de uso comerc a más usad s para ref nar e tamaño de grano son med ante enfr am ento ráp do con e uso de temp aderas en os mo des y e refinam ento qu m co med ante agentes nuc eantes

2.5.1.1. Refinamiento por enfriamiento rápido mediante templaderas.

Este t po de refinam ento se ogra cuando se ut izan mo des metá cos como en nyecc ón y vac ados en mo de permanente o cuando se ut izan mo des de arena con nsertos metá cos os cua es ayudan a extraer e ca o de a p eza ráp damente para de esta manera provocar e subenfria ento necesario para que se de a nuc eac ón heterogénea este t po de

refinam ento t ene una c erta profund dad hac a e nter or de a p eza a cua depende de a geometr a de a p eza y de a capac dad de extracc ón de ca or de a temp adera

Además de ref nam ento de grano e enfriam ento ráp do t ene otros efectos en la m croestructura como a mod f cac ón parc a de a estructura eutéct ca la nfluenc a en la red str buc on y morfo og a de as fases ncas en Fe que se menc onó en e cap tu o anterior y el más mportante que es a d sm nuc ón de espac am ento nterdendrit co secundario factor que me ora notab emente as prop edades mecán cas

2.5.1.2. Refinamiento quimico del tamaño de grano mediante agentes nucleantes.

Este t po de ref nam ento de grano se ogra med ante a ad c ón de suf c ente numero de part cu as que puedan actuar c mo nuc e s act vos para e proceso de nuc eac ón heterogénea d sm nuyendo sens b emente a neces dad de un gran subenfr am ento

Para esta a eac ón e t tan o ha s do ut zado desde hace 50 años como ref nador de grano como se muestra en e d agrama b nar o A T de a F gura 2 20a se presenta la prec p tac ón de compuesto TiA a part r de una nten d de t tan o mayor a 0 2 Este compuesto actua como un nu eo med ante a rea n per té t ca de a ecuac ón 2 19 a una temperatura aprox mada de 665 C F gura 2 2 b

L qu d + T A + I so do [2 19]

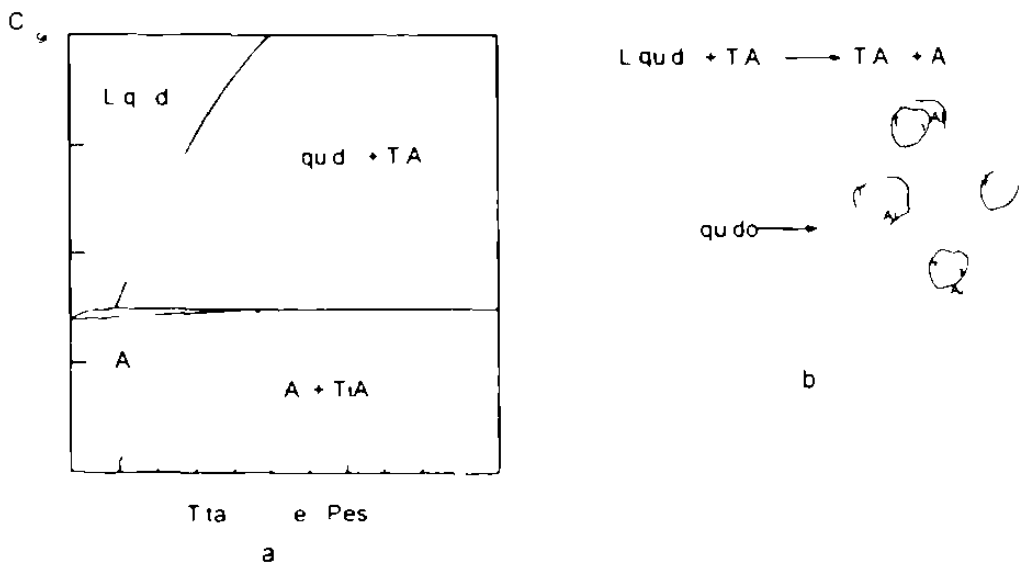


Figura 2.20. a D agrama de fases par a de A T b Pro es de nuc eac ón med ante a reacc on per téct ca

Como ya se menc onó anter ormente a prec p tac on de a fase T A sólo se da a a tas concentrac ones de T y deb do a que este e emento es muy caro normalmente en las fund c ones se trata de refinar con conten dos de entre 0 01 a 0 03 ₀ de T por lo que e t tan o es añad do a baño metá co med ante sa es de T o a eac ones maestras A -Tı en las que se observa deb do a su a to conten do de t tan o a presenc a de fases T A ₃ F gura 2 21a Es por esto que a ntroduc r estas part cu as a baño de a um n o se vue ven nestables y luego de un corto t empo desaparecen gradua mente d sm nuyendo su capac dad ref nadora Se ha descub erto rec entemente que a ad ón de boro med ante a eac ones maestras Al-T -B aumenta e t empo de v da de as part cu as refinadoras med ante un proceso que aun no es comprend do F gura 2 21b

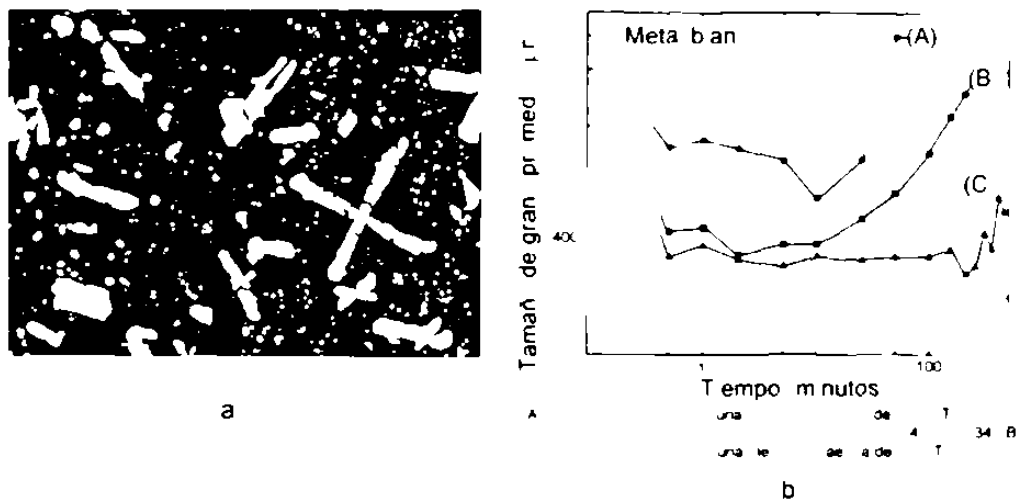


Figura 2.21. a M croestructura de una a eac ón maestra comerc a de A -Tı b) Hab dad ref nadora de d st ntas a ea ones maestras

2.5.2. Modificación del eutéctico Al-Sı.

Como ya se menc nó en punt s anter res e crec m ento de a fase eutéct ca se da con una ntercara facetada en c ertas d recc ones cr sta graficas F gura 2 22a Durante e crec m ento de a fase de S es muy fác que se f rmen mac as en e p ano 111 con un ángu o de 141 grados en a nterfase só d qu d F guras 2 22a y b

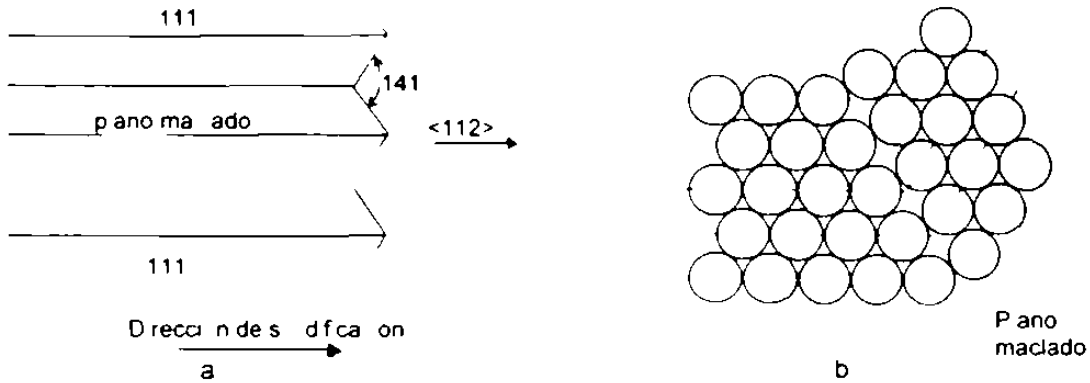


Figura 2.22. a Representac ón esquemát ca de crec miento de los cr stales de Si b) Representac ón esquemát ca de arreg atóm co a través de plano mac ado [1]

La mod f cac ón de a estru tura de eut-ect co es e camb o de una morfo og a am nar a una f brosa F gura 2 23 a d ferenc a entre estas d s estructuras es e aumento de ramas de crecim ento durante a s d f a ón de a m rf og a f br sa Este aumento de ramas ha sido exp cado med ante m cros op a e e trón ca ya que se ha observado que la estructura mod f cada t ene una may r cant dad de ma as var os ordenes de magn tudes mayor que la estructura no m d f cada

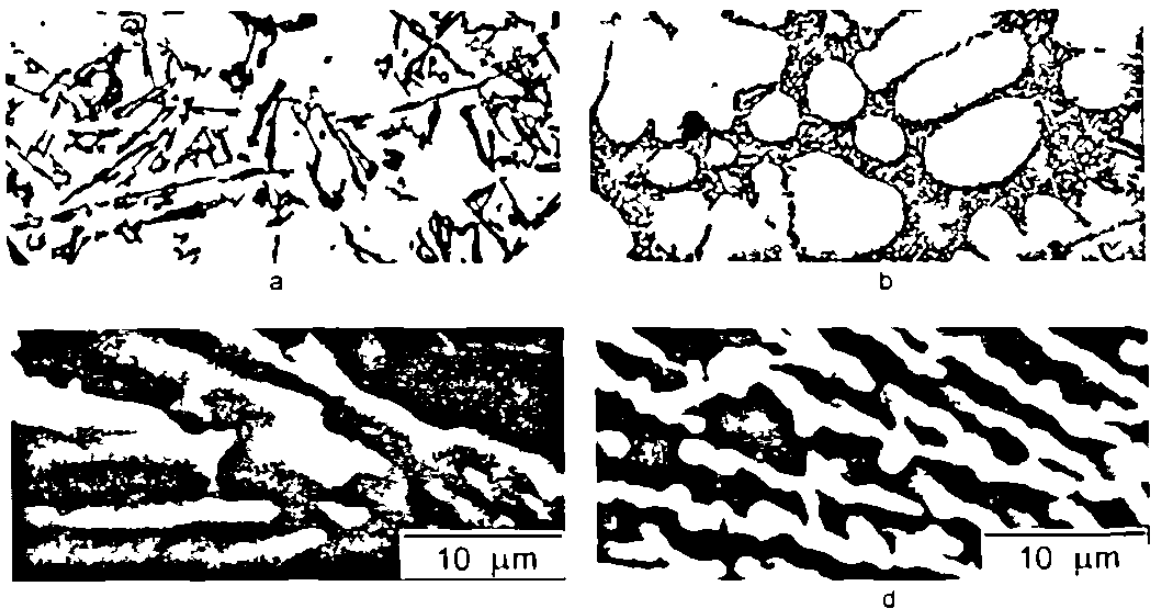


Figura 2.23. F tom rograf as de estructuras eutect cas no mod f cadas zqu erda y mod f cadas derecha a y b m roscop pt o 1 0x c y d m croscop o e ectrón co de barndo

En cuanto a as prop edades mecán cas a estructura no mod ficada actua como acumu ador de esfuerzos nternos fac tando a propagac ón de as fracturas d sm nuyendo sobre todo a res stenc a a mpacto en cuanto a a estructura mod ficada por su tamaño más fino y su forma más redondeada contr buye a aumento de esfuerzo u t mo de tensión y sobre todo ncrementa e va or de a duct dad

Existen dos maneras de ograr una estructura mod f cada

1 Mod f cac ón por a tas ve oc dades de enfr am ento Esta no es rea mente una modificac ón ya que se ha encontrado que a cant dad de p anos mac ados no aumenta con el ncremento en a ve oc dad de enfr am en o que sucede es que e tamaño promedio de as estructuras am nares d sm nuye

2 Mod f cac ón qu m ca Este t p de mod f ca ón es provocada por a ad ción de elementos qu m cos que actuan c mo mpurezas durante a so d f cac ón de s c o fac tando a f rmac ón de p anos mac ad s

2.5.2.1. Modificación quimica del eutéctico.

Este t po de m d f cac ón t ene ugar uando c ertos e ementos cuyo rad o atóm co es aprox madamente 1 646 ve es e rad de s s n agregad s a baño metá co y son abs rb dos en a ntercara de s d f ca n de a fase euté t ca de s c o func onando como mpurezas pr vocand e aument de a apar n de p anos ma ados en e Si F gura 2 24)

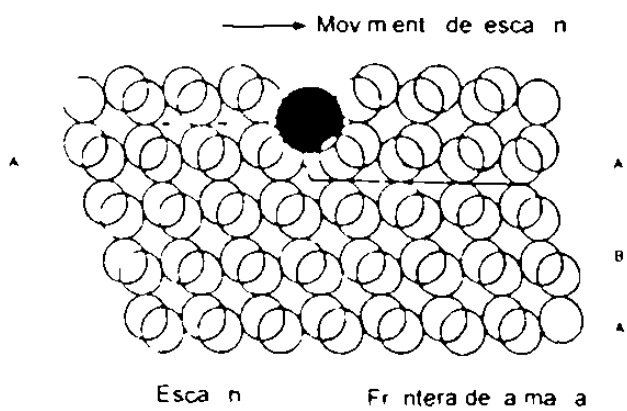


Figura 2.24 Represenla ón esquemát ca de una mpureza provocando una mac a

E ementos como e sod o potas o ant mon o rub d o cer o ca c o estroncio bar o antano e trio func onan como mod ficadores pero comerc a mente só o son ut ızados el sod o estronc o y ant mon o De estos tres e Na es e me or formador de mac as pero tıene e defecto de que su efecto mod f cador dura muy poco t empo E Sb t ene una v da arga como agente act vo pero só o se pueden obtener con é estructuras am nares Por su parte e Sr t ene buena capa dad mod f cadora y su t empo de v da act va es aceptab e por o que es el de mayor uso a n ve ndustr a

2.5.3. Fases ricas en Fe.

Como ya se menc onó anter rmente en a ntroducc ón c ertos e ementos como el Fe Cu y Mg presentan ba a s ub dad en estado s do p r o que t enden a segregarse durante la so d f cac ón F gura 2 25 y cuando e qu do remanente se ha enr quec do o suf c ente y a canza a c mp s c ón adecuada se presenta a so d f cac ón de fases rıcas en estos e ementos

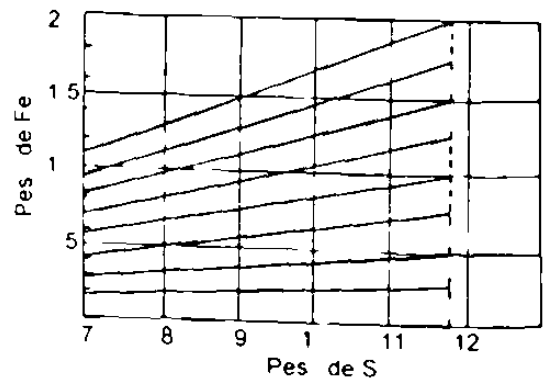


Figura 2.25. L neas de Segrega ón de Fe ca cu adas de acuerdo a a ecuac ón de Sche

De a uerd a a comp s n de qu d remanente y as cond c ones de so d f cac ón se pueden presentar d st nt s t p s de fases r cas en Fe as más comunes son a A FeS y A Mn Fe S. En a Tab a 2 3 se muestran a secuen a de pre p tac ón de fases para una a eac ón h po-eutéct ca A S

rden de reacci n	Rea on		Temperatura sugenda C)
	A MnFe S pnman od s	Pre-dendrt ca	650
1	Desarro de a red dendr tica de A pnmario	Dendr tica	609
2a	q→A + A · MnFe S	Post-dendr t ca	590
2b	q→A + A FeS + A MnFe Si	Pre-eutectica	590
3	q →A + S	Eutect ca	575
	+ A FeS	Co-eutectica	
4	q →A + A Cu + S + A FeS	Post eutécticas	525
5	q →A + A₂Cu + S + A Mg Cu S	Post eutéct cas	507

Tabla 2.3. Secuenc a de prec p tac ón de fases para una a eac ón h po-eutéctica Al-Si[3]

2.5.3.1. Sistema Al-Fe-Mn-Si.

Para fac tar el estudio de a prec p tac ón de fases r cas en Fe se tendrá que analizar el d agrama s mp f cado de fases de s stema A Fe Mn-S de a F gura 2 26

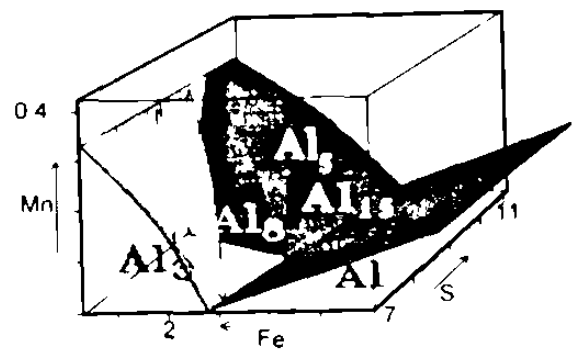


Figura 2.26. D agrama de fases de s stema A Fe Mn S en e que se muestran as reg ones para cada fase r ca en Fe A_3 A Fe A A Fe_2S A A FeS $A_{15}A_1$ Mn Fe_3S_2[3]

Como se puede ver e d agrama anter or s gue s endo comp e o por o que tomando en ~uenta que a so ub dad de Mn en e a um n o só do y qu do es s m ar se puede cons derar que e conten do de Mn permanece constante durante a s d f cac ón De esta manera se puede s mp f car e d agrama de a F gura 2 26 hac endo e cortes honzonta es obten endo d agramas como os mostrados en a F gura 2 27

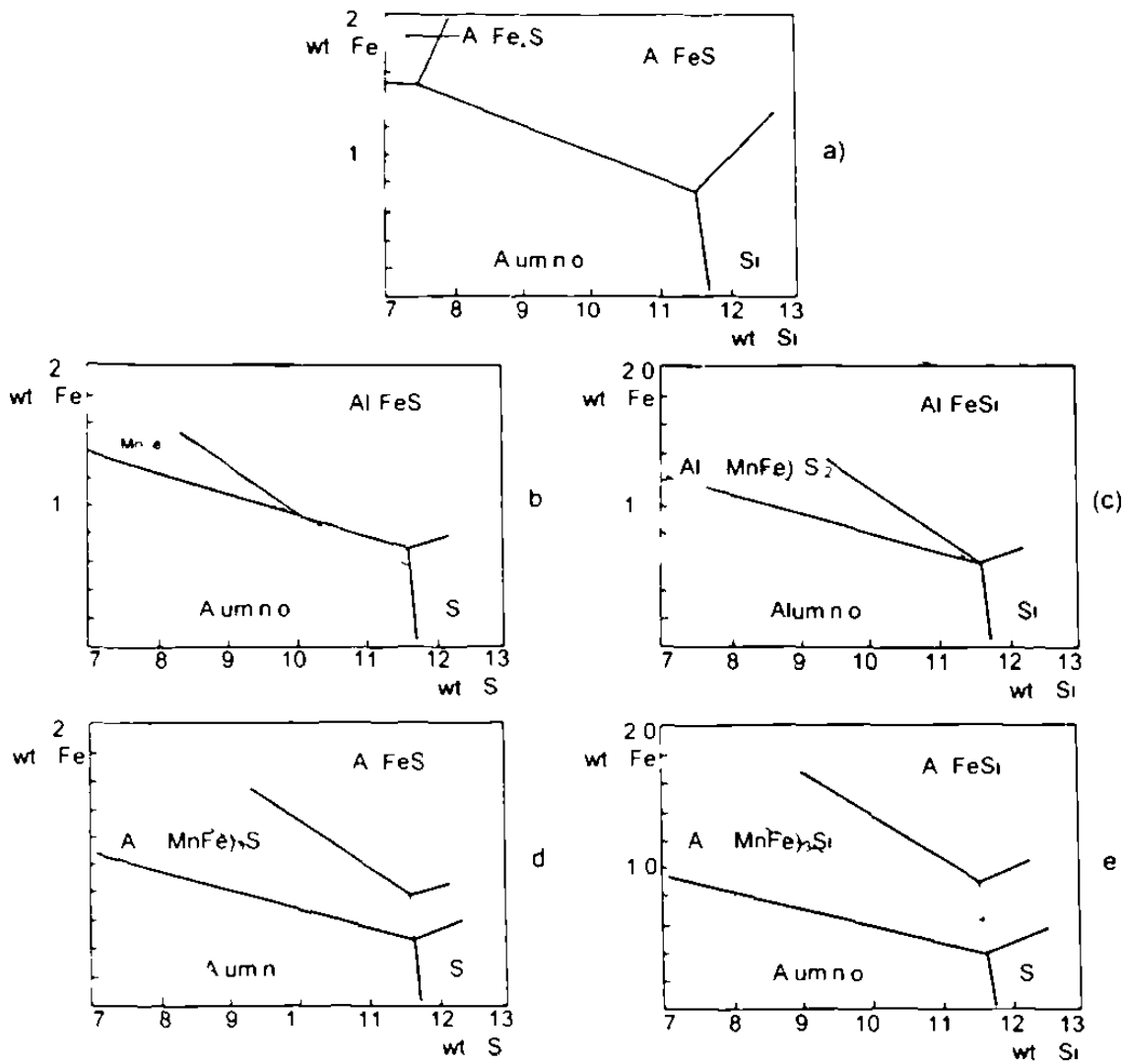


Figura 2.27. Representa ón s mp f cada de d agrama A Fe S con d st ntos nten dos de Mn a 0 Mn b 0 1 Mn c 0 2 Mn d 0 3 Mn e 0 4 Mn

S se superp ne a nea de segregac ón de Fe a un d agrama on 0 36 de Mn como s m strad s en a F gura 2 27 se obtendrá a ruta de segregac n y prec p tac ón para una a ea n de t po 319 F gura 2 28

En esta u t ma f gura se puede observar que c nforme so d f ca e a um n o pnmano en f rma dendr t ca e conten do de Fe y S aumenta en e qu do remanente 1 cuando a nea de segrega ón penetra a zona de a fase ı A Mn Fe S, ésta com enza a so d ficar 2a C nf rme s d f ca esta fase e Mn se consume y a z na A Mn Fe S d sm nuye y

aumenta a zona de a fase β A_5FeS por o que a egar e qu do a a compos cion de a l nea d v sor a entre estas dos zonas com enzan a so d f car as dos fases juntas 2b hasta a canzar a compos c ón eutéct ca Cuando se a canza a compos c ón eutéct ca e Al Si y la fase β so d f can juntas 3

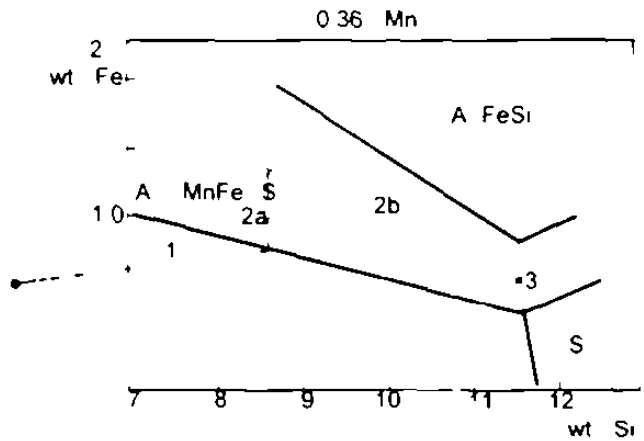


Figura 2.28. Ruta de segregac ón y prec p tac ón de fases r cas en Fe dentro de un d agrama de fases A -Fe-S con 0 36 de Mn

2.5.3.2. Fases Al_5FeSi y $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$.

Como se v o en e punto anter or a fase A_5FeS so d fica preferenc almente en ausenc a de Mn o elementos que tengan efectos s m ares como e Cr F gura 2 27a) Esta fase t ene forma de p aquetas v sta en 2 d mens ones su forma es ac cu ar F gura 1 1a su estructura es monoc n ca por o cua es muy dura y frág por su forma t ende a concentrar esfuerzos nternos en a p eza además de ser s t os preferenc a es para a propagac ón de gr etas

Por su parte a fase A Mn Fe S_2 crece preferenc a mente só o en presenc a de e ement s como e Mn Cr Co Be Mo N y S s endo de estos e Mn e más efect vo en camb ar de a estructura | a a ι Esta fase crece con estructura cub ca y es extremadamente dura más aun que a fase | a venta a que presenta ante a fase ι es su forma más compacta amada escr tura ch na F gura 1 1b

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Obtención de muestras.

Las probetas se vac aron en cond c ones de p anta Para obtener as composiciones deseadas la trayector a del meta fue la s gu ente pr meramente se fund ó la aleac ón en un horno rotatorio de cua el meta pasó a una estad a en un horno mantenedor de reverbero luego de o cua e meta fue evado en una o a de 5 tone adas hac a una estac ón de desgasificado en os cua es se rea zaron ajustes a a compos c ón Después de proceso de desgas ficado el qu do fue evado a un horno mantenedor de 6 tone adas de ser necesar o e ajuste fina de la compos c ón se rea ızó en este ugar este horno a su vez a menta a una estac ón de ba a pres ón as muestras fueron tomadas de este u t mo par de hornos

3.1.1. Análisis quımico.

Las pr betas no fueron va adas hasta que e persona de aboratorio qu mico de a empresa rea zara os aná s s de compos c ón de meta para cada exper mento De ser ne esar a c mpos c ón fue a ustada como ya se menc onó anter ormente

Las muestras obten das fueron dent ficadas y se ut ızaron para obtener a compos c ón qu m ca fina de cada muestra os resu tados obten dos se muestran en a Tab a 3 1 Todos os aná s s se rea zaron en un espectrómetro de ch spa

Prueba	C nd ciones	S	Cu	Fe	Mn	Mg	T	Cr	Sr	A
1	Fe T Sr	6 78	3 123	0 282	0 09	0 34	0 066	0 01	0 0081	89 2
2	Fe(T Sr +)	6 66	3 045	0 330	0 14	0 27	0 069	0 013	0 0158	89 2
3	Fe(- T +) Sr	6 43	2 926	0 299	0 12	0 27	0 151	0 011	0 0078	89 6
4	Fe( ) Ti(+) Sr(+	6 50	2 901	0 318	0 13	0 28	0 181	0 012	0 0132	89 5
5	Fe +) Ti) Sr)	7 55	3 324	0 619	0 44	0 35	0 083	0 031	0 0088	86 7
6	Fe + T Sr +)	7 46	3 329	0 620	0 44	0 31	0 085	0 032	0 0147	86 9
7	Fe + T + Sr	7 29	3 223	0 641	0 43	0 28	0 142	0 032	0 0069	87 1
8	Fe + T + Sr(+)	7 33	3 185	0 628	0 42	0 30	0 152	0 032	0 0159	87 1

Tabla 3.1. Compos c ón qu m ca de as d st ntas muestras

3.1.2. Velocidades de solidificación.

Para a obtenc ón de las d stintas velocidades de enfriam ento se util zaron dos moldes uno de arena y otro de meta Para as bajas ve oc dades de enfriamiento se emp eó un molde de arena equ pado con un termopar en e centro de la copa como se muestra en a F gura 3 1a el cual perm t ó hacer e reg stro de la curva de enfriam ento Las a tas veloc dades de enfr am ento se obtuv eron con e mo de metá co ut l zado norma mente para obtener muestras estándar para e aná sis quim co de la aleac ón Figura 3 1b) este molde fue mod ficado para nsertar e un termopar t po K de 1 6 mm de espesor y obtener de esta manera e reg stro de la curva de enfr am ento

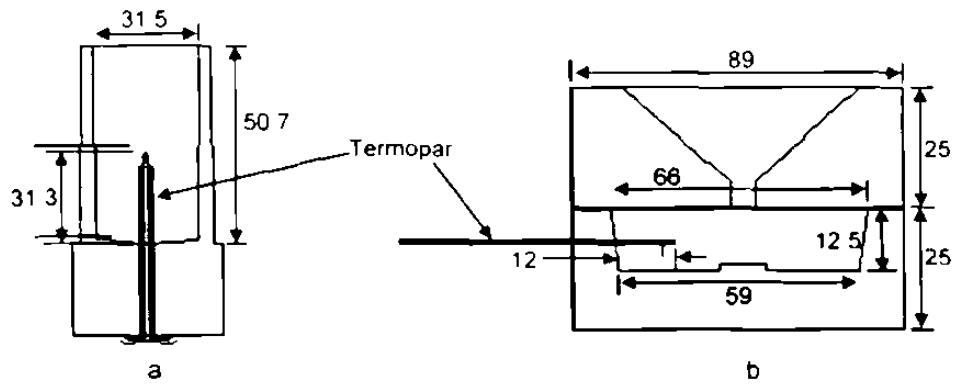


Figura 3.1. D agrama de os mo des ut izados para e vac ado de as muestras a mo de de arena b mo de metá co d mens ones en mm

3.1.3. Registro de las curvas de solidificación.

E reg stro de las curvas de enfriam ento se rea ızó med ante un programa d señado para la captura de temperaturas por med o de una computadora persona E s stema consta de una nterfase d g tal cuya func ón es e mınar la punta fr a de os termopares que están ınsertados en los mo des y una nterfase ana óg ca-d g ta nsta ada en a computadora Fıgura 3 2)

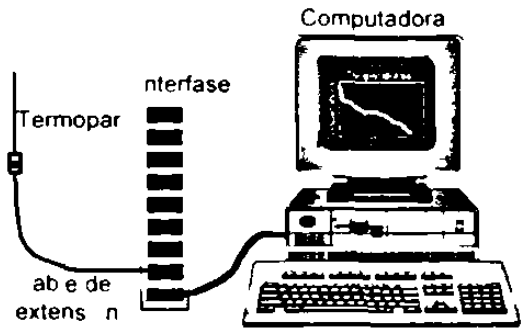


Figura 3.2. D agrama de equ po usado para capturar as temperaturas

3.1.4. Corte de las muestras.

Las muestras después de ser ut ızadas para obtener la compos c ón qu m ca fina fueron secc onadas med ante una cortadora meta ográfica Abras mat c 2 ta como o muestra en a F gura 3 3 obten endo de esta manera a cant dad necesaıa de probetas para e aná s s en a cond c ón de vacıado y con os d ferentes tratam entos térm cos

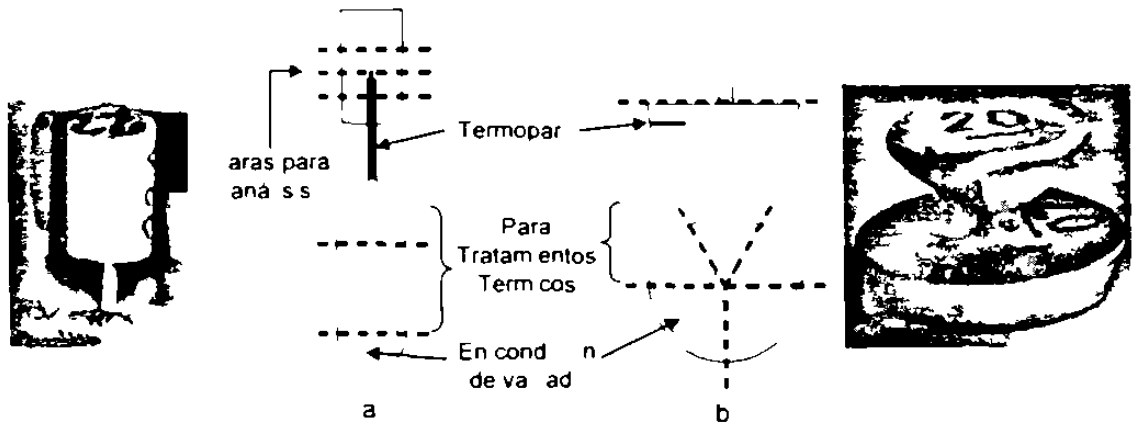


Fıgura 3.3. D agrama de corte de as muestras para os d st ntos tratam entos térm cos a muestra s d ficada en mo de de arena y b muestra so d ficada en mo de metá co

3.2. Tratamientos térmicos.

Durante a rea ización de os tratam entos térm cos se ut ízó e equ po de captura de temperaturas descrito en e punto 3 1 3 con e cua se obtuv eron dos ectura de temperaturas adicionales a las del contro ador de horno una de e as cercana a as probetas y la otra en el centro de una de as probetas d chas ecturas fueron tomadas con termopares t po K de 1 6mm de d ámetro exterior ad c ona mente todo e grupo de probetas fue empaquetado en papel a umin o para mejorar a un f rm dad de a temperatura entre e as Este arreg o perm t ó tener un mayor control sobre a temperatura a canzada en as muestras

3.2.1. Tratamiento térmico de solubilizado.

Los tratam entos térm cos de so ub zado se rea izaron a temperaturas de 460 480 y 500 C en un horno de res stencia e éctrica Industr as SOLA BASIC L ndberg Toma ·do un t empo de permanenc a a a temperatura de so ub zado de 6 horas segu do de un enfriam ento ráp do en agua a temperatura amb ente Los curvas de temperatura t empo reg stradas en cada uno de estos tratam entos se muestran en a F gura 3 4

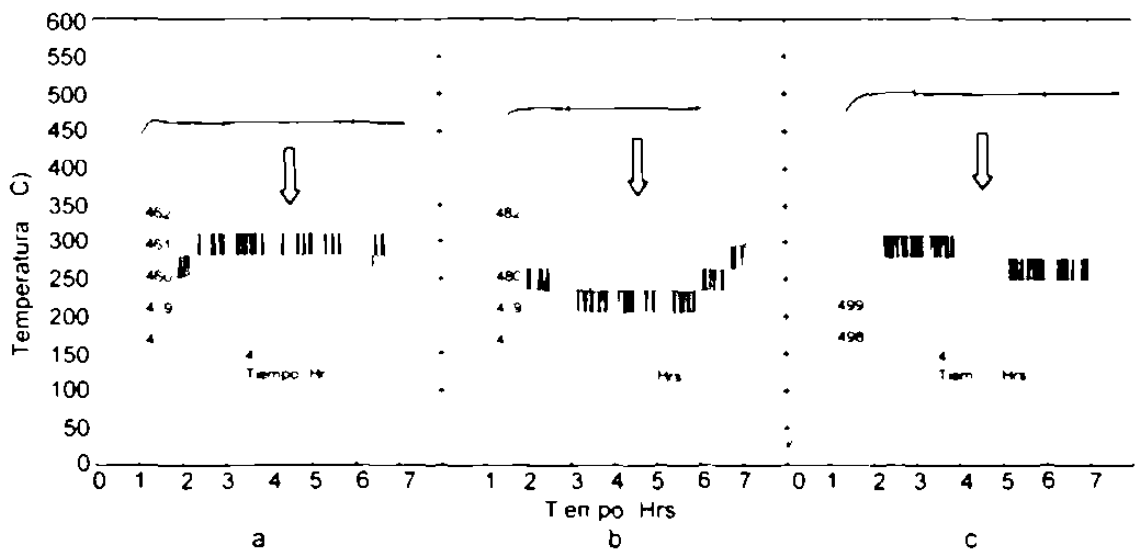


Figura 3.4. Reg stro de temperaturas de os tratam entos térm cos de so ub ízado a 460 C b 480 C y c 500 C

3.2.2. Tratamiento térmico T7 (Sobreenvejecido).

El tratam ento térm co de sobreenvejec do se rea ızó a una temperatura de 240 C en un horno de resistenc a eléctr ca FELISA mode o 291 Tomando un t empo de permanenc a a la temperatura de solub zado de 3 horas segu do de un enfr am ento ento a a re Deb do a la cantidad de muestras se dec d ó tratar por separado cada uno de os grupos antes so ub lizados las curvas de temperatura-tiempo reg stradas en cada uno de estos tratam entos se muestran en la F gura 3 5

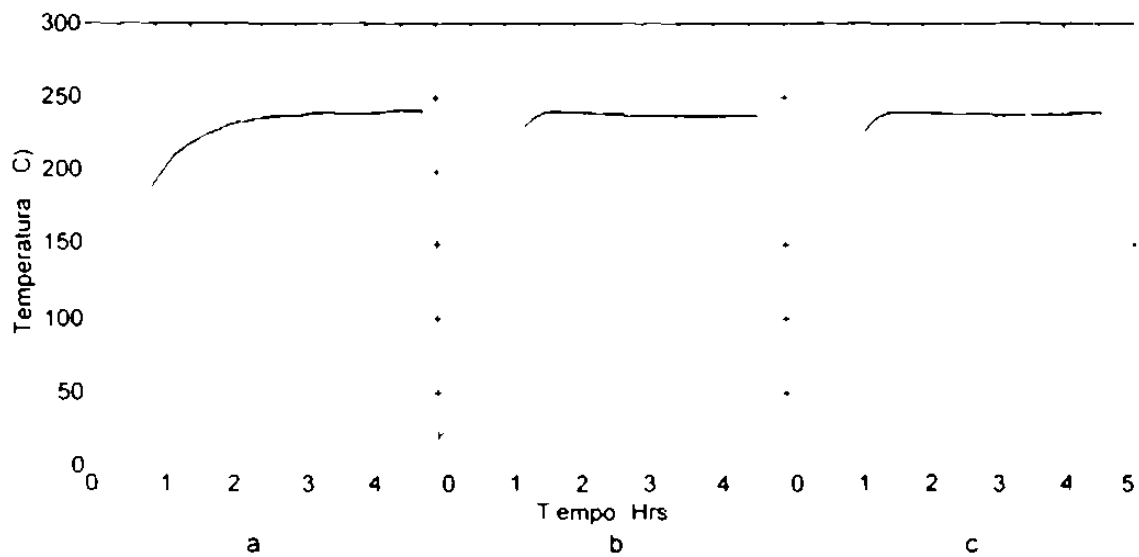


Figura 3.5. Reg stro de temperaturas de os tratam entos térm cos de sobreenvejec do a muestras solub zadas a 460 C b muestras so ub ızadas a 480 C y c muestras so ub zadas a 500 C

3.3. Preparación metalográfica y análisis microestructural.

Las muestras fueron cortadas y montadas en uc ta F gura 3 6 segu do de un desbaste en grueso y f no con jas de S C de 180 hasta 2400 para prosegu r con un pu do fino con d amante de 3 y 1 μm segu do de un pu do con una suspens ón de s ca co o da de 0 25 μ m

3.3.1. Análisis microestructural.

Las muestras fueron ana zadas en a cond c ón de pu do med ante mıcroscop a ópt ca M croscop o O mpus MN3 desde 50 hasta 800 magn ficac ones y m croscop a estereográfica

conectados ambos a un ana ızador de mágenes C emex V s on vers on 2 2 opc ona mente se obtuv eron fotom crografias de ambos m croscop os ut ızando pe cu a ASA 100

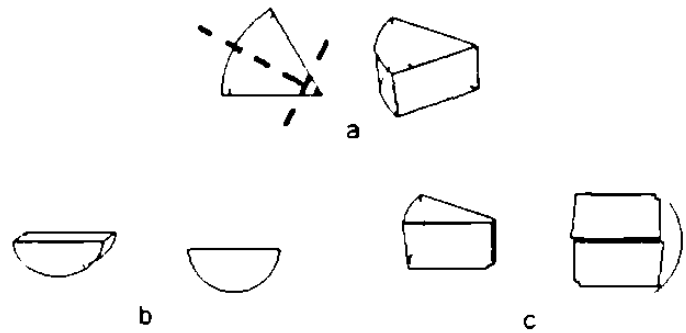


Figura 3.6. a Corte fina y para muestras de enfr am ento ráp do b y c montaje en u ta para prepara ón meta ográf ca

Se obtuvo e aná s s de as d st ntas fases r cas en Fe y as fases ncas en Cu y datos de parámetros como e espac o nterdendr t co secundar o DAS y e tamaño de grano En a Tab a 3 2 se muestra e área ana zada y as magn ficac ones a as que fueron rea zadas las med nes de as fases r cas en Fe y Cu

	F ses ncas en Fe		F ases r cas en Cu	
T po de m de	M de de Arena	M de Metá co	M de de Arena	M de Metá co
Magn f ca nes	200	800	200	800
Area p r campo μm^2	247721 27	15188 3	247721 27	15188 3
ampos	2	200	50	50
Area t ta μm^2	49544254	3 3766	12386063	759415

Tabla 3.2 Parámetros y áreas ana zadas en cada muestra

De aná s s de as d st ntas fases se obtuv eron dat s como e porcentaje de área detectada a cant dad de part cu as detectadas por campo ana zado y e área a ong tud y a esfer dad de cada una de as fases detectadas

A cont nuac ón se da una breve descrpc ón de cada uno de os parámetros med dos en e ana zad r de mágenes

1 E porcentaje de área detectada Es e promed o de área suma de os p xe es detectados a o argo de campo ana izado expresado en un dades prev amente ca bradas detectada en os campos ana zados con respecto a área de campo

2 Part cu as detectadas por campo Es e promed o ar tmét co de a cant dad de partículas fases detectadas en cada campo ana zado a o argo de as muestras

3 E área promed o de as fases Es e promed o de área med da en cada una de las fases part cu as detectadas en e área ana zada

4 La ong tud promed o de as fases Es e promed o de a ong tud máx ma d stanc a lineal entre los dos puntos más a ejados de la part cu a med da en cada una de as fases part cu as detectadas en e área ana zada

5 La esferic dad Es e promed o de a esfer c dad 4πArea Per metro med da en cada una de as fases part cu as detectadas en e área ana izada

3.3.1.1. Espacio interdendritico secundario.

E espac o nterdendr t co secundar o DAS fue tomado só o en as muestras que permanec an en cond c ones de vac ado ya que estos parámetros se mant enen constantes aun después de tratam ento térmico Para obtener este dato se obtuvo e promed o de a d stanc a entre 40 brazos dendr t cos secundarios para e s a ub cac ón de estos brazos se encuentra dentr de área de aná s s de fases

3.3.1.2. Tamaño de grano.

Para este aná s s se ut zaron as muestras en nd c ón de vac ado as cua es fueron atacadas qu m camente para reve ar a frontera de grano con e s gu ente react vo nmers ón durante 5 m nutos en una so uc ón compuesta de 2m HF 3m HC y 5 m de HNO en 190 m de H O [4]

Para determ nar e tamaño de grano se ut izó e m cr scop o estereográfico um nado con uz po arizada ro o aman o verde y azu para remarcar as fronteras de grano de as

d st ntas muestras se ut ızó e método de ntercepc ón nea de acuerdo a a norma ASTM E 112

3.3.1.3. Modificación del eutéctico Al-Si.

La obtenc ón de grado de mod ficac ón de as muestras se ogro med ante e método de comparac ón de as mágenes obten das a 200 aumentos en e microscop o óptico de cada una de as muestras que permanecian en a cond c ón de vac ado La comparación se hizo contra la c as f cac ón propuesta por Ape an · a cua se ha convert do en e estándar

3.3 1.4. Análisis de fases ricas en Fe.

En e aná s s de as fases r cas en Fe presentó prob emas ya que no obstante que a s mp e v sta as fases eran detectab es por su co or e ana ızador de mágenes presentaba prob emas para d scern r entre a matrız de a um n o y as fases r cas en h erro y las ricas en cobre s bre todo a a tas magn f ca nes esto deb d a a s m tud de os tonos entre estas fases y a matr z provocada por a d g ta zac ón de a magen y a heterogeneidad de la um nac ón en a magen proven ente de m croscop o ópt co

Por o anterior se h zo necesario hacer un contraste más fuerte entre las fases presentes en a a eac ón med ante e ataque qu m co de as pr betas E ataque qu m co de las muestras presentó grandes d f cu tades y no obstante que se ut ızaron a mayor parte de os ataques reportados en a teratura [42] [28] y con e s se ograba d st ngu r as fases con mayor fac dad no eran o sufic entemente contrastantes para ser ut zados en e ana ızador de mágenes de manera automát ca E me or ataque para d st ngu r as fases ricas en h erro sobre todo a fase fue e s gu ente nmers ón durante 5 m nutos a temperatura amb ente en una s uc n c mpuesta de 50 m de agua y 50 m de á do fosfórico H PO Este react vo rea ıza un ataque preferenc a sobre a fase ı A MnFe S y en menor grado ataca a fase β A FeS

E aná s s de as fases ricas en Fe se rea zó tanto en as muestras que permanec an en nd ón de vac ado como en as que fueron somet das a tratam ento térm co ya que a temperatura de horno durante e tratam ento térm co no a canzó a temperatura m n ma para que hub era camb os en a morfo og a de estas fases Por o que fue pos b e ana ızar 50 campos en a m sma secc ón de cada una de as muestras 1 en cond c ón de vac ado y 3 muestras con d st nta temperatura de so ub ızac ón omo o muestra a F gura 3 7 ten endo de esta manera

en tota 200 campos para cada una de as 16 cond c ones 8 compos c ones d st ntas a 2 veloc dades de so d ficación

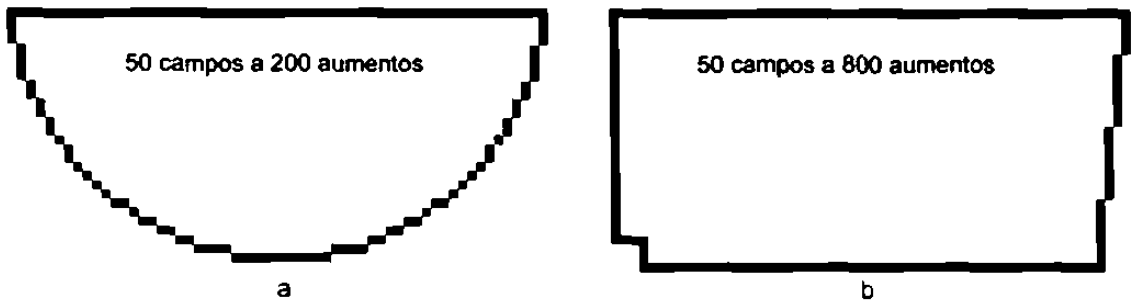


Figura 3.7. D agrama de área de aná sis m croestructura de las muestras a mo de de arena bajas ve ocidades de so d ficac ón) b mo de metálico a tas ve oc dades de so d f cac ón

3.3.1.5. Análisis de fases ricas en Cu.

En e caso de anál s s de as fases r cas en Cu a temperatura a a que se ·ea ızaron los tratam entos térm cos de so ub ızado s afecta a forma y e área de as fases por lo que s gu endo e patrón de aná s s de a F gura 3 7 se obtuv eron en tota 50 campos para cada una de as 64 cond c ones una muestra en cond c ón de vac ado y tres con d ferentes temperaturas de so ub zado por 8 compos c ones d st ntas y 2 ve oc dades de so d ficac ón

3.3.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB).

E aná s s se rea ızó en cuatro muestras en cond c ón de vac ado dos de e as con bajo conten do de Fe m sma compos c ón una de e as vac ada en e mo de de arena y a otra en el mo de metá co y as dos muestras restantes que presentaban a to conten do de Fe m sma mpos c ón que as anteriores só o var ando e conten do de Fe una muestra vac ada en mo de de arena y a otra en e mo de metá co

E aná s s se rea ızó en un m cr scop o e ectrón co de barrido MEB LEO S440 prev o a este aná s s as muestras fueron preparadas meta ográficamente como se menc onó anter ormente segu do de esto se rea zaron m cro dentac ones cerca de as áreas con presenc a de as fases de nterés ya con un buen numero de denta ones en cada muestra se proced ó a tomar fotom crografias en d chas áreas a 200 aumentos en as muestras vac adas en mo de de arena y a 800 aumentos en as muestras vac adas en e mo de metá co

Con as dentac ones en as muestras y as fotom crograf as se fac tó a dent ficac ón de as d st ntas fases en e MEB donde se obtuv eron mágenes pr nc pa mente en a manera de e ectrones retrod spersados y una buena cant dad de ana s s qu m cos sem cuant tat vos puntua es med ante EDX energ a de d spers ón de rayos X de as d st ntas fases r cas en Fe y Cu tamb én se obtuv eron os espectros correspond entes

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Espaciamiento interdendrítico secundario.

A rea zar as med nes de espa am ent nterdendr t co secundar en as muestras se c mpr bó que s exper ment s se rea zar n ba dos reg menes de s d f ca ón d ferente E pr mer de e s con muestras s d f cadas entamente en mo des de arena mostro va ores de 49 8 a 62 54 µm y e segundo c n muestras s d f cadas ráp damente en mo de presentar n va res de 12 61 a 17 1 µ m Tab a 4 1

Pr eba	d es	Muest as s d f cadas en m des de arena µ m	M estras s d f cadas en m des meta s µ m
1	Fe T S	61 45	15 65
2	Fe T Sr +	60 59	16 1
3	Fe T + r	59 27	17 1
4	Fe T + r +	61 37	16 9
5	Fe + T r	53 95	13 21
6	Fe + T Sr +	51 25	12 61
7	Fe + T + Sr	49 8	14 72
8	Fe + T + r +	62 54	15 75

Tabla 4.1. Espa am ento nterdendr t o secundar o de as muestras s d f cadas en m des de arena y en m de metá co

Estas d s nd nes de so d ficac n provocan que e aná s s de esu tados durante e p esente ' aba se haga separando as muestras de acuerdo a a ve oc dad de so d fica ón t po de mo de

4.2. Refinamiento de grano.

A ana zar as muestras se dec d ó separarlas en dos grandes grupos a muestras enfr adas en mo des de arena y as muestras enfr adas en mo de metá co deb do a que a ve oc dad de so d f cac ón es un factor que afecta sens b emente e refinam ento de grano

4.2.1. Muestras con bajas velocidades de solidificación.

A atacar qu m camente as muestras enfr adas entamente para reve ar os granos se observó que a tota dad de as muestras presentaban gran s equ ax a es as macrofotograf as de estas muestras se presentan en e Apénd e A

4.2.1.1. Efecto del contenido de Ti.

A rea zar a medic ón de tamaño de grano se bserv que todas as muestras que ten an a to conten do de T mostraban tamaños de grano de entre 45 y 8 más pequeño que las muestras de compos c ón s m ar de ba nten d de T Est comprueba e buen ref nam ento de tamaño de grano obten d en as muestras de a to onten do de T L s resu tados obten dos de a med c ón de tamañ de gran se muestran en a Tab a 4 2 y se presentan graf cados contra e c nten d de T en e Apénd e B

4.2.1.2 Efecto del contenido de Fe.

Se observó que as muestras que t enen un ba o onten do de Fe presentan un tamaño de gran menor que as que t enen a to onten d de Fe este fen meno es mucho más apre ab e en as muestras que t enen ba s nten d s de T en d has muestras e tamaño de grano que se obtuvo fue de 2648 y 2245 μm para as de a t nten d de Fe y de 776 y 68 μm para as muestras c n ba o conten do de Fe En camb as muestras n a t conten do de T presentan una d sm nuc ón de tamaño de gran men s apre ab e bten énd se va res de 491 y 438 μm para as muestras on a t c nten d de Fe y de 378 y 372 μm para as de ba o conten do de Fe Tab a 4 2 A graf car e tamaño de gran ntra e nten d de Fe se observa mas c aramente esta tendenc a Apénd e B

4.2.1.3. Efecto del contenido de Sr.

En a tota dad de as muestras enfr adas entamente se bserv que en comp s c nes s m ares a aumentar e conten do de Sr e tamañ de grano t e de a d sm nu r en as muestras

con compos c ones de a to T este efecto se reduce m entras que en as de bajo conten do de T a reducc ón en el tamaño de grano se aprec a más Apénd ce B

Prueba	ndici nes	Muestras so d f cadas en mo des de arena µms	Muestras sol d ficadas en mo des metá icos µms)
1	Fe Ti Sr	776	713
2	Fe T Sr +	680	570
3	Fe Ti + Sr	378	430
4	Fe( ) T + Sr +	376	384
5	Fe + T) Sr)	2648	754
6	Fe + T Sr +	2245	855
7	Fe + T + Sr	491	564
8	Fe(+ T + Sr +	438	436

Tabla 4.2. Tamaño de grano promed o obten d para as muestras so id f cadas en mo de de arena y en mo de metá ico

4.2.2. Muestras con altas velocidades de solidificación.

A atacar quimicamente as muestras enfr adas ráp damente para rebe ar os granos se observó que a mayor parte presentaban granos equ ax a es só o dos muestras con bajo conten do de T presentaban granos co umnares as macrofotograf as de estas muestras se presentan en el Apénd ce A

4.2.2.1. Efecto del contenido de Ti.

A rea zar a med ción de tamaño de grano en estas muestras se observó que as que presentaban a to conten do de T mostraban tamaños de grano de entre 25 y 49 más pequeño que as muestras de compos c ón s m ar de bajo conten do de T s endo este porcenta e menor que e de as muestras enfr adas entamente pero aun as bastante a to para as cond c ones de so d f cac ón Los resu tados obten dos de a med c ón de tamaño de grano se muestran en a Tab a 4 2 y se presentan graf cados contra e conten do de T en e Apénd ce B

Un punto nteresante es e hecho de que as muestras con a to conten do de T so d f cadas ráp damente muestran un tamaño de grano mayor que e presentado por as muestras de a to conten do de T so d f cadas entamente contrastando este comportam ento con e de as muestras de ba o conten do de T que presentan menor tamaño de grano que sus s m ares de ba o conten do de este e emento so id ficadas e mo des de arena s endo éste e comportam ento norma mente esperado

4.2.2.2. Efecto del contenido de Fe.

Se observó que as muestras que t enen un ba o conten do de Fe presentan un tamaño de grano menor que as que t enen a to conten do de Fe ésto se puede apreciar en la gráfica de tamaño de grano contra e conten do de Fe de Apénd ce B Esta d sm nuc ón del tamaño de grano no es tan aprec ab e como e camb o observado en as muestras enfr adas entamente lo nteresante de esta eve d sm nuc ón de tamaño de grano se presenta en as muestras que t enen bajos conten dos de T en as que se observó a presen a de granos co umnares solo en las que ten an a to conten do de Fe Apénd ce A

4.2.2.3. Efecto del contenido de Sr.

En estas muestras tamb én se enc ntr e m smo fenómeno de gera d sm nuc ón de tamaño de grano menc onado en as muestras so d f cadas en m de de arena e un co juego de compos c ones que no s gu ó esta tendenc a fue e de as muestras de a to contenido de Fe y Ti Apénd ce B

4.3. Modificación del eutéctico Al-Si.

Dentro de aná sis m croestructura se ver f có e grado de mod f cac ón de las estructuras estéct cas de A S de as muestras s d ficadas en mo des de arena d chas muestras presentaron un ba o e rregu ar grad de mod ficac ón e cua puede c as f carse como C ase 3 parc a mente mod ficado esta fa ta de mod fica ón se presenta en todas as muestras enfr adas entamente hac éndose más notor o en as muestras con ba o conten do de Sr Tab a 4 3 Este fenómeno pos b emente se deba a que a hacer os a ustes fina es a las compos c ones de a gunos de os exper mentos se agregó e Sr poco antes de que se obtuv eran as muestras por que a fa ta de homogene zac ón o estronc o remanente en el baño pueden ser as causas de a fa ta de mod ficac ón

A rea zar e aná s s de as muestras s d ficadas en m des metá cos se encontró que éstas presentaron un grado de mod f ca ón que puede c as ficarse como entre C ase 4 y 5 caracter zadas por a ausenc a de estructuras am nares y estructuras fibrosas respect vamente Tab a 4 3 este grado de mod ficac ón es causado en mayor med da por a formac ón de estructuras am nares finas de S que v stas a m croscopio ópt co se presentan como estructuras mod f cadas qu m camente y en menor med da a aumento en a formac ón de

macias durante a so d f cac ón de eutéct co A -S [129] ambos fenómenos son causados por las a tas ve oc dades de so d ficación que se tuv eron en os mo des metá cos

Prueba	C ndiciones	Muestras s d ficadas en mo des de arena	Muestras sol d f cadas en mo des metá icos
1	Fe T Sr	3	4
2	Fe( ) T Sr +	3	4
3	Fe) T + Sr	3	5
4	Fe T + Sr +	3	4
5	Fe + T) Sr	3	5
6	Fe + T Sr(+)	3	4
7	Fe +) T + Sr	3	4
8	Fe + T + Sr +	3	4

Tabla 4.3. Grado de mod f cac ón de eutéct co A S de as muestras so d f cadas en mo de de arena y en mo de metá co

En este trabajo no se estud aron os camb os sufr dos por e eutect co A Si deb dos a los diferentes tratam entos térm cos de so ub zado que rec b eron as muestras

4.4. Análisis de fases ricas en Fe.

E aná s s de las fases r cas en Fe comenzó con e procesado de as imágenes obten das de cada una de as muestras med ante e m ros p o óptco y e analizador de mágenes con los cua es se obtuv eron datos acerca de por enta e de área detectada e área promedio de as fases la ong tud promed o de as fases y a esfer c dad E conteo de as fases se rea zó d ferenc ado as fases α y β de acuerdo a sus formas caracter st cas escr tura ch na y agujas respectivamente

E segundo paso de aná s s fue ver ficar a compos ón qu m ca de as fases ya detectas para este fin se ut zaron as muestras de bajo y a to conten do de Fe so d f cadas en mo des de arena y mo des metá cos en a cond c ón de meta mod ficado y refinado esto se ogró med ante e aná s s sem cuant tat vo puntua en e m roscop o e ectrón co de barr do de os resu tados obten dos se muestran as compos c ones más representat vas en a Tab a 4 4

En e estud o de as compos c ones se encontró una a ta s m tud en ambas fases por o que se dec d ó que en e aná s s se tomar a e comportam ento de tota de as fases ricas en Fe para cada una de as d st ntas cond c ones de vac ado y compos c ones qu m cas

estud adas En cuanto a a c as ficac ón que se rea ızó de as fases se hace só o una breve descripc ón de as fases encontradas su ub cac ón y cua fue e criterio de c as ficac ón uti ızado

	C mpos n qu m ca de a fase							mpos on qu m ca de a fase					
	Enfriam ento lento y baj conten do de Fe 0 3												
#ı	A	S	Mn	Fe	Cu	Cr	#	Al	S	Mn	Fe	Cu	Cr
1 ı	56 0	11 7	8 66	16 5	5 6	1 47	1	46 9	35 5	2 49	13 2	1 17	
2 ı	55 6	12 1	9 02	15 6	5 87	1 59	2 (	55 3	19 1	3 19	16 4	5 87	
	Enfr am ento lent y a to conten do de Fe 0 6)												
3 ı	56 6	12 5	10 6	15 2	3 72	1 08	3 (	57 2	18 7	2 75	19 5	1 67	
4 ı	56 9	10 8	4 62	18 5	9 04		4	76 8	8 99		5 45	8 77	
	Enfriam ento ráp do y bajo conten do de Fe 0 3												
5 ı	69 1	12 3	1 11	4 72	12 7		5 β						
6 ı	77 7	10 2	1 25	4 89	5 81		6						
	Enfriamiento rápido y alto contenido de Fe (0 6												
7 ı	61 9	9 39	6 54	11 9	10 1		7 β	67 5	18 3	3 77	6 94	3 39	
8 ı	51 7	27 6	5 56	13 7	1 31		8 (	67 2	18 9	3 47	7 85	2 5	

Tabla 4.4. Anál sis qu m co sem cuant tat vo de las fases α y β ba o d ferentes cond c ones de vac ado

Los espectros y as mágenes obten das en el m croscopio electrón co de barndo de cada una de las fases anal zadas en la Tab a 4 4 as como sus respect vas fotom crografias se muestran en e Apéndice C

4.4.1. Muestras con bajas velocidades de solidificación.

Los resu tados obten dos de aná s s de magen de as ocho compos c ones qu m cas de as muestras so d f cadas en mo des de arena se pueden observar en a Tab a 4 5 para fac tar e aná s s pre m nar de estos resu tados se graf caron en e Apénd ce D os datos de cada uno de os parámetros m croestructura es med dos de acuerdo a su cond c ón de vac ado y su compos c ón qu m ca

A comparar os va ores de porcentaje de área detectado de as muestras de ba a y a ta ve oc dad de so d f cac ón mostrados en a F gura D1 se puede observar que este va or es mayor para as de ba a ve oc dad de so d ficac ón

141 3.

Prueba	Cond ciones	Area detectada	Area pr med de las fases µm	Longitud promedio de as fases µm	Esfencidad
	Fe T Sr -	1 008	108 53	40 02	0 298
2	Fe T Sr +	1 277	113 51	38 25	0 345
3	Fe T + Sr	1 181	108 25	28 85	0 311
4	Fe(T + Sr +	1 226	116 73	28 84	0 320
5	Fe + T Sr	2 692	225 32	28 72	0 502
6	Fe + T Sr +	2 970	246 26	28 44	0 525
7	Fe + T + Sr	3 138	275 40	31 93	0 493
8	Fe + T + Sr +	3 057	269 51	31 36	0 509

Tabla 4.5. Aná s s de magen de as fases de a to conten do de Fe de as muestras so d f cadas en mo des de arena

E área y a ong tud promed o de as fases son otr s parámetros que refle an a nfluencia de a ve oc dad de so d f ca ón F guras D2 y D3 ya que se puede observar que as fases de as muestras so id f cadas en m des de arena son de 15 a 20 veces más grandes y de 5 a 8 veces más argas que as fases de as muestras so d ficadas ráp damente Esto se puede expl car por la c nét ca de crec m ento de las fases ya que as bajas ve oc dades de so d ficac ón perm ten nuc ear y crecer hasta formar estructuras más def n das escr tura ch na ɪ y agujas (

Se encontró que a esfer c dad de as muestras so d f cadas entamente es baja genera mente pero as muestras de ba o conten do de Fe presentan os va ores más bajos F gura D4

4.4.1.1. Efecto del contenido de Fe.

A observar as mágenes bten das durante e aná s s de magen de as muestras de ba o conten do de Fe so d ficadas entamente se puede aprec ar que a mayor parte de área detectada está ocupada por a fase A FeS agu as as cua es se oca zan en e eutéct co de A -S Esto puede aprec arse en a F gura 4 1a en a cua se muestra a m rografia de a prueba 1 [Fe T y Sr] después de ser procesada en e ana ɪzad r de mágenes en e a se observa a m croestructura en genera y as fases detectadas a rea ɪzar e aná s s de magen fase ɪ en co or morado y fase en co or aman Las mágenes obten das para a tota dad de as cond c ones de vac ado en a cond c ón de ataque y después de aná s s de magen se muestran en e Apénd ce E

Figura 4.1. Fotomicrografías de análisis de las fases rícas en Fe de las muestras solidificadas lentamente a Prueba 1 [Fe T Sr] y b Prueba 5 [Fe + T - Sr]

En las muestras de alto contenido de Fe se encontró casi en su totalidad la fases α-Al_1 $MnFeSi_2$ con forma de escritura china Figura 4 1b la cual tiende a ubicarse dentro de la matriz de aluminio y en muy pocas ocasiones se localizan agujas de la fase β que se localizan en el eutectico de Al Si En la Figura 4 1b se puede apreciar la fotomicrografía de la prueba 5 [Fe + Ti - y Sr] en la cual se pueden observar las dos fases detectadas al realizar el análisis de imagen fase α en color morado y fase en color amarillo el resto de las imágenes de las muestras de alto contenido de Fe solidificadas en moldes de arena se muestran de las Figuras E5 a la E8 del Apéndice E

Al comparar los resultados de las muestras con bajo y alto contenido de Fe se encontró que las primeras presentan por lo general valores menores en la mayoría de los parámetros microestructurales analizados a un caso que no siguió esta tendencia fue la longitud promedio de las fases Figura F1

El primer parámetro analizado fue el área de fase detectada en cada campo la cual presenta valores de entre 1 0 y 1 3 de área total analizada para las muestras de bajo contenido de Fe y de 2 6 a 3 2 de área total analizada para las muestras de alto contenido de Fe encontrándose que las muestras sin refinamiento y sin modificación presentaban las áreas detectadas con valores más bajos lo que puede explicarse por ser ésta la muestra con contenidos de Fe más bajos en ambas composiciones Figura F1a y F4 Otro punto importante es que tanto en las muestras de bajo contenido de Fe como en las de alto contenido se encontró que conforme se aumenta el contenido de Fe el área de fase detectada aumenta también Tabla 4 5 y Tabla 3 1

E área promed o de as fases presenta a m sma tendenc a a a alza só o que el aumento no es tan pronunc ado ya que este parametro presenta aumentos de entre el 107 y e 154 a camb ar e contenido de Fe de bajo a a to En as F guras F1b y F4 se puede observar que os va ores de las muestras de a to conten do de Fe presentan un aumento en el área promed o de as fases conforme se ncrementa e conten do de Fe

La un ca var ab e que fue a a baja a aumentar e contenido de Fe fue a long tud promed o de as fases F gura F1c ya que ésta t ende a d sm nu r obten éndose d sminuciones desde el 17 hasta e 28 F gura F4 esto se puede exp car por a apar c ón de agujas largas v sta en dos d mens ones de la fase β prop c adas por e bajo conten do de Mn en la compos c ón qu m ca de las muestras con bajos conten dos de Fe lo que hace que no se cump a a re ac ón de 2 a 1 entre e Fe y e Mn factor que favorece el crecim ento de la fase β

La esferic dad es otra var ab e que se puede aprec ar a a alza en la F gura F1d con va ores entre 0 29 a 0 35 para as muestras de ba o conten do de Fe hasta va ores de entre 0 49 y 0 53 Tabla 4 5 este aumento en a esfer c dad puede ser atr bu do también a la formac ón de a fase en forma de agujas en as muestras de ba o conten do de Fe y Mn

4.4.1.2. Efecto del contenido de Ti.

En la F gura F2 se muestran os promed os de os va ores obten dos de ana izador de imágenes para as fases ricas en Fe de as muestras so d f cadas en mo des de arena los cua es se encuentran graf cados de acuerdo a su conten do de T en estas gráficas se puede observar que só o as muestras de a to conten dc de Fe presentan tendenc as a aumentar el va or de parámetros como e área detectada por campo e área promed o de las fases y la ong tud promed o de as fases conforme se aumenta e conten do de T en las muestras y pasar de muestras s n ref nam ento con va ores de a rededor de 0 8 a valores de 0 15 ₀ en las muestras ref nadas E un co parámetro que no s gu ó a tendenc a es a esfenc dad a cua se comportó como en as muestras de ba o conten do de Fe esto es s n un camb o aprec ab e a o argo de os d ferentes conten dos de T

4.4.1.3. Efecto del contenido de Sr.

Ana zando as F guras F3 y F6 en a que se muestran os d st ntos parámetros m croestructura es med dos en as muestras so d ficadas en mo des de arena graficados contra su conten do de Sr se puede determ nar que e conten do de este e emento no uega un pape mportante en a formac ón y crec m ento de as fases ricas en Fe

4.4.2. Muestras con altas velocidades de solidificación.

En la Tab a 4 6 se presentan os resu tados obten dos de aná s s de magen de as ocho compos c ones qu m cas de as muestras so d f cadas ráp damente en mo de metá ico estos va ores tamb en se graficaron en e Apend ce D de acuerdo a su cond c ón de vac ado y su compos c ón qu m ca

El porcentaje de área detectada para estas fases es un poco menor como ya se menc onó anteriormente esta d ferenc a se e puede atribu r a mpos b dad prác t ca de detectar fases demasiado pequeñas ya que éstas no tuv eron t empo suficiente para crecer durante la ráp da so dificación propic ada por e mo de metá co (F gura D1)

En estas muestras se presentaran estructuras más pequeñas que las muestras so d ficadas lentamente el área promed o de as fases se encuentra entre 4 y 14 μm^2 y su ongitud promed o es de 3 a 8 μm Tab a 4 6 Las a tas ve oc dades de so d f cación hace que la forma de las fases sea poco def n da y achatado s endo estos factores que aumentan sens blemente la esfer c dad de as part cu as F guras D4

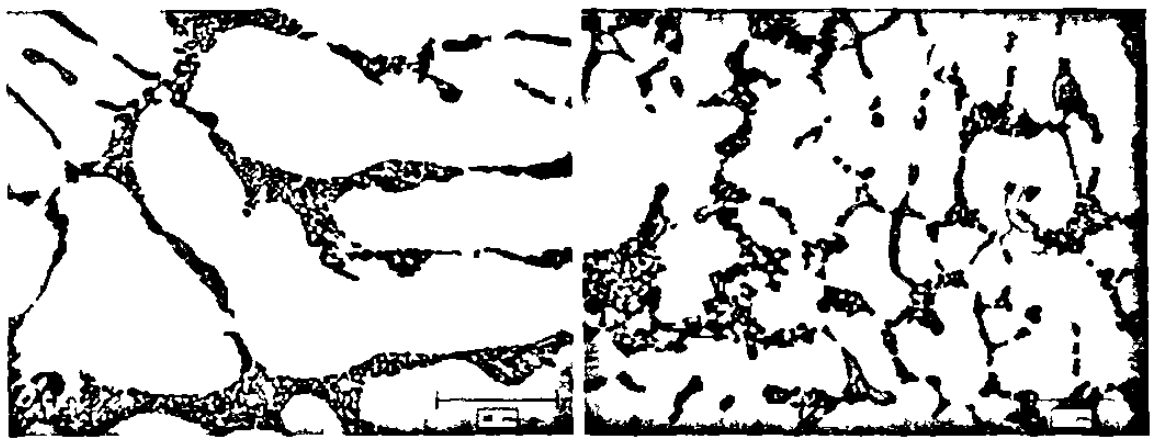
Prueba	nd nes	Area detectada	Area pr med de as fases μm	L ngitud pr med de as fases μm	Esfer dad
1	Fe(T Sr	0 931	4 86	3 72	0 710
2	Fe Ti) Sr +	1 074	4 97	3 81	0 687
3	Fe) T (+ Sr)	1 058	6 21	4 35	0 652
4	Fe) Ti +) Sr +	0 927	5 5	3 99	0 667
5	Fe + Ti) Sr	2 556	4 56	3 90	0 679
6	Fe + T Sr +)	2 511	4 17	3 60	0 684
7	Fe + T + Sr	2 922	13 09	7 98	0 539
8	Fe + T + Sr +	2 577	13 27	8 04	0 527

Tabla 4.6. Aná s s de magen de as fases de a to nten do de Fe de as muestras so d f cadas en mo des metá cos

4.4.2.1. Efecto del contenido de Fe.

A observar as mágenes obten das durante e aná s s de magen de as muestras de bajo conten do de Fe so d ficadas ráp damente se puede aprec ar que a mayor parte de área detectada está ocupada por fases pequeñas oca izadas en e eutéct co de Al S como se observa en a F gura 4 2a Durante e aná s s de magen se dec d ó c as ficar estas pequeñas fases por no tener forma agu a como fases A MnFe S_2 por o cua se encuentran

co oreadas de morado no obstante que esta cond ción de vac ado presentó los menores conten dos de Fe y Mn La tota dad de as mágenes obten das bajo estas condiciones de vac ado se pueden aprec ar en e Apénd ce E en a condición de ataque y después de aná sis de magen de as Figuras E9 a a E12



a b

Figura 4.2. Fotomicrograf as de aná s s de as fases r cas en Fe de as muestras solidificadas rápidamente a Prueba 1 [Fe - T - Sr] y b Prueba 5 [Fe + Ti Sr -)]

En las muestras de a to conten do de Fe se encontraron fases con dos morfolog as d ferentes la pr mera de e as eran una muy sim ar en su forma a as encontradas en las muestras de bajo conten do de Fe esto es fases pequeñas de morfo og as compactas ub cadas en e eutéct co de A S las cua es fueron c as f cadas como fase α-A $_1$ MnFe) Si_2 la compos c ón qu mica de estas fases t ene va ores mayores en e conten do de Fe y Mn que el de as muestras de ba o conten do de Fe so d ficadas en e m smo t po de mo de pero aun menores al de as muestras so d ficadas en mo des de arena La segunda fase a go más grande y de formas a argadas que tamb én se encuentran ub cadas en e eutéct co A S se c as ficó por su forma como a fase β-A_5FeS esta estructura presentó conten dos de Fe y Mn un poco menores a os encontrados de a pr mer fase detectada en estas muestras En a F gura 4 2b se puede aprec ar a m crograf a de a prueba 5 [Fe + T - y Sr] so d f cada en mo de metá co en a cua se pueden observar as dos fases detectadas a rea izar e aná s s de magen fase α en co or morado y fase β en color amar o e resto de as mágenes de as muestras de a to conten do de Fe se muestran de a F gura E13 a a E16 de Apénd ce E

Las muestras de a to conten do de Fe presentan por o genera valores mayores que as de bajos conten dos de Fe so d ficadas ráp damente en os va ores referentes a área promed o por part cu a y a promed o de porcentaje de área detectada por campo

A comparar os resu tados de as muestras con bajo y a to conten do de Fe se enoentró que estas muestras no presentan as m smas tendenc as que en las so d ficadas en mo des de arena esto es que so o en a gunas ocas ones a menores contenidos de Fe se presentan va ores menores en os parámetros m croestructura es ana izados F gura F7

El primer parámetro ana izado es e área de fase detectada en cada campo e cual presenta va ores de entre 0 9 y 1 1 de área tota ana zada para as muestras de bajo conten do de Fe y de 2 5 a 2 9 de área tota ana zada para as muestras de a to contenido de Fe encontrándose que as muestras s n refinam ento y s n mod ficac ón presentaban las áreas detectadas con va ores más bajos o que puede exp carse por ser ésta la muestra con contenidos de Fe más bajos para ambas compos c ones F gura F7a y F10 La elación entre e aumento de conten do de Fe y e aumento en e área de fase rica en Fe encontrada en as muestras so d ficadas en mo des de arena no se s gue a a perfecc ón en as muestras so d f cadas ráp damente encontrándose que só o las muestras con más conten do de Fe presentaban los mayores va ores encontrados (Tab a 4 6 y Tab a 3 1

E área promedio de as fases presenta va ores muy homogéneos de entre 4 86 y 6 21 μm^2 en as muestras de bajo conten do de Fe m entras que para as de ba o conten do de Fe se presentan dos tendenc as una a la alza para as muestras ref nadas en a cua e tamaño de as part cu as alcanza va ores de a rededor de 13 μm^2 m entras que para as muestras s n ref nam ento se encontraron va ores de 4 17 y 4 56 μm^2 de a muestra mod ficada y a de metal b anco F gura F7b y Tab a 4 6) este extraño comportam ento se puede re ac onar con la cant dad de fases por campo encontradas en estas dos muestras ta es va ores osc an a rededor de 80 y 90 fases por campo m entras que e resto de as muestras presentan va ores de entra 23 y 33 part cu as por campo ana izado

La ong tud promed o de as fases presentó una tendenc a muy s m ar a área promed o de as fases F gura F7c este comportam ento tamb én se e puede atr bu r a a cant dad de part cu as detectadas por campo ana izado Un punto muy mportante a ana izar en os va ores graf cados de esta var ab e es que en as dos muestras de a to conten do de Fe muestra refinada y muestra mod ficada y refinada que tienen cant dades norma es de fases detectadas por campo a rededor de 30 a ong tud de as fases t ende a aumentar a rededor de un 100 %

con respecto a sus s m ares de bajo conten do de Fe o nteresante de estos resu tados es que se contraponen con os obtenidos en as muestras so id f cadas en mo des de arena F gura F10 mostrando esto que a bajos conten dos de Fe as a tas ve oc dades de so d ficación tienen un efecto mayor de d sm nuc ón de tamaño de as fases ricas en Fe que e efecto de formac ón de agujas argas de a fase β producto de a ausenc a de a re ac ón 2 a 1 entre e Fe y e Mn

La un ca var ab e que s gu ó una tendenc a a la baja a aumentar el conten do de Fe fue a esfericidad (F gura F7d mostrando de esta manera que as altas veloc dades de so id f cación t ene un efecto preponderante en a d sm nuc ón de crecim ento y desarro lo de as fases lo que hace que se formen só o part cu as pequeñas y muy compactas aumentando a esfer c dad

4.4.2.2. Efecto del contenido de Ti.

En a F gura F8 se presentan os promed os de os va ores obten dos de ana izador de mágenes para las fases ricas en Fe de as muestras so d f cadas en mo de metá co graficados de acuerdo a su conten do de T en estas gráf cas se puede observar que só o as muestras de a to contenido de Fe presentan a m sma tendenc as a la a za que presentan as muestras so d f cadas entamente en mo des de arena sobre todo en e área promed o de las fases y la ongitud promedio de as fases E unico parámetro que camb a su comportamiento es a esfer c dad a cua s gue una tendenc a pronunc ada a a ba a a aumentar e conten do de T en as muestras de a to conten do de Fe

4.4.2.3. Efecto del contenido de Sr.

En a F gura F9 se muestran os d st ntos parámetros m roestructura es med dos en as muestras so d f cadas en mo de metá co graf cados contra su conten do de Sr encontrándose que a gua que en as muestras so d f cadas entamente e Sr n uega un pape mportante en a formac ón y crec m ento de as fases r cas en Fe

4.5. Análisis de fases ricas en Cu.

Es conven ente menc onar que a rea izar a p aneac ón de as compos c ones de os exper mentos de presente trabajo e conten do de Cu no fue tomado como una var ab e pero os resu tados de aná s s qu m co fina presentado de a Tab a 3 1 muestran que as compos c ones de bajo conten do de Fe tamb én presentan una gera d sm nuc ón en e conten do de Cu mostrando va ores de 0 20 a 0 29 en peso de Cu menos que as muestras

de a to conten do de Fe por o anterior se hace una d ferenc ac ón durante e aná s s de as d st ntas muestras tomando en cuenta s e conten do de Fe es a to o bajo s endo esto una referenc a tamb én de conten do de Cu

A hacer e aná s s qu m co de as fases de a to conten do de Cu Tab a 4 7 en e m croscop o e ectrón co de barndo se encontró que e conten do de este e emento var a de manera s gn f cat va con e camb o de ve oc dad de so d f cac ón encontrándose va ores de 50 a 55 de Cu en peso para as muestras so d f cadas en mo des de arena y va ores entre 25 y 40 para as muestras sol d ficadas ráp damente en mo de metá co

ompos n qu m ca de as fases r cas en u							
Enfriam ento ent y Fe				Enfr am ent ráp d y Fe			
#	A	Cu	S	#	A	u	S
1	46 27	51 47	2 27	5	62 68	37 32	
2	46 18	51 44	2 38	6	73 95	26 5	
Enfr am ent ent y Fe +				Enfr am ent ráp d y Fe +			
3	42 15	55 47	2 38	7	53 09	37 93	7 93
4	42 25	55 41	2 34	8	65 85	34 15	

Tabla 4.7. Aná sis qu m co sem cuant tat vo de as fases de a to cor ten dos de Cu prec pitadas durante a so id f cac ón bajo d ferentes cond c ones de vac ado

Los espectros y as mágenes obten das en e m croscop o e ectrón co de barndo de cada una de las fases ana izadas en a Tab a 4 7 as como sus respect vas fot m crograf as se muestran en el Apénd ce G

4.5.1. Muestras con bajas velocidades de solidificación.

Los resu tados obten dos de aná s s de magen de as ho compos c ones qu m cas de las muestras so d f cadas en mo des de arena se pueden observar en a Tab a 4 8

Para fac tar e aná s s pre m nar de estos resu tados se graf caron en e Apénd ce H os datos de cada uno de os parámetros m croestructura es med dos en as muestras que permanec an en a cond c ón de vac ado s n tratam ent térm co de so ub izado graficandose de acuerdo a su cond c ón de vac ado ve oc dad de so d f cac ón y su compos ón qu m ca

Pr eba	Tratamiento termico	Cond nes	A ea detectada	Fases promed detectadas por campo	A ea promed de as fases m	L ngitud promed de las fases m	Esfericidad
1	Cond Vac	Fe T Sr	1 183	61 86	47 39	12 94	0 657
1	So 460 C	Fe T Sr	0 963	51 24	46 58	12 71	0 685
1	So 480 C	Fe T Sr	0 695	38 28	45 2	12 06	0 726
1	So 500 C	Fe T Sr	409	19 14	53 02	13 47	0 700
2	C nd Va	Fe T Sr +	1 391	59 7	57 75	13 91	0 651
2	So 46 C	Fe T Sr +	0 920	46 78	48 72	12 55	0 708
2	So 480 C	Fe T Sr +	0 789	29 48	66 31	14 98	0 684
2	S 500 C	Fe T Sr +	0 587	21 9	66 42	14 56	0 686
3	C nd Va	Fe T + Sr	892	4 92	54 04	13 57	0 640
3	S 460 C	Fe T + Sr	1 51	45 7	56 99	13 57	0 703
3	So 48 C	Fe T + Sr	668	24 96	66 30	14 80	0 694
3	So 500 C	Fe T + Sr	0 102	7 62	33 48	9 99	0 749
4	C nd Vac	Fe T + Sr +	0 896	42 76	51 93	13 38	0 649
4	S 460 C	Fe T + Sr +	1 072	46 22	57 47	13 30	0 719
4	So 480 C	Fe T + Sr +	553	21 52	63 71	14 88	0 671
4	S 500 C	Fe T + Sr +	447	16 9	65 58	14 71	0 705
5	C nd Vac	Fe + T Sr	1 3 5	43 64	74 11	15 6[illegible]	0 62
5	So 460 C	Fe + T Sr	1 452	43 1	83 48	15 98	0 677
5	S 480 C	Fe + T Sr	1 098	33 94	80 16	16 14	0 682
5	S 500 C	Fe + T Sr	0 626	18 82	82 45	16 33	663
6	Cond Va	Fe + T Sr +	1 627	50 96	79 95	16 04	630
6	S 460 C	Fe + T Sr +	1 380	39 96	85 58	16 67	0 668
6	So 480 C	Fe + T Sr +	0 860	25 14	84 83	16 97	657
6	S 500	Fe + T Sr +	679	17 8	94 50	17 29	0 661
7	C nd Vac	Fe + T + Sr	1 71	45 54	93 06	17 56	606
7	S 460 C	Fe + T + Sr	0 6 3	23 36	64 1	14 61	0 647
7	So 48 C	Fe + T + Sr	0 393	11 66	8 64	16 1	649
7	So 500 C	Fe + T + Sr	393	11 66	90 88	17 05	0 675
8	C nd Va	Fe + T + Sr +	1 88	39 56	68 18	14 51	0 639
8	S 46 C	Fe + T + Sr +	0 649	21 5	74 81	15 41	676
8	S 480 C	Fe + T + Sr +	0 751	18 28	101 80	18 7	0 655
8	S 500 C	Fe + T + Sr +	237	6 52	90 18	17 79	605

Tabla 4.8. Aná s s de magen de as fases de a to conten do de Cu segregadas durante a so d f cac ón en as muestras so d ficadas en mo des de arena

A comparar os va ores de porcentaje de área detectado en as muestras de ba a y a ta ve oc dad de so d ficac ón F gura H1 no se observa n nguna tendenc a predom nante

La cant dad de part cu as detectadas por campo se graficaron en a F gura H2 en a que se observa una gera tendenc a decrec ente de a cant dad de fases conforme e baño metá co es tratado meta urg camente pasando de meta b anco a meta mod f cado o refinado y fina mente meta mod f cado y refinado

E área y a ong tud promed de as fases graf cadas en as F guras H3 y H4 respect vamente se puede observar a nfluenc a de a ve oc dad de so d f cac ón sobre e tamaño y ongitud de as fases ya que as muestras so d f cadas en mo des de arena son de 7 a 30 veces más grandes y de 2 a 5 veces más argas que as fases de as muestras so d f cadas ráp damente

Otro punto a tomar en cuenta a rev sar os va res de área y a ong tud de las muestras so d f cadas en m des de arena es e c aro deca m ento en os va res de as muestras de bajo conten do de Fe c n respecto a as de a to conten do de Fe Como ya se menc onó anter ormente as muestras de bajo conten do presentan va ores de entre 0 20 y 0 29 en peso de Cu menores que sus s m ares de a to c nten d de Fe por o qu- se pueden re acionar estas d sm nuc ones en e área promed o de as fases de entre 23 9 para as muestras ref nadas y mod f cadas y 41 93 en as muestras so amente refinadas) y en a ong tud promed o de as fases de entre 7 8 para as muestras ref nadas y mod f cadas y 22 8 en as muestras so amente ref nadas n e onten do de Cu en e meta

Por o expuesto en e párraf anter or se dec d ó que a hacer e aná s s de a nfluenc a de as temperaturas de so ub zad sobre os parámetr s m roestructura es ana izados se tomara en cuenta e conten do de Cu Apénd e por o ua se compararan os va ores de as muestras de compos c ones s m ares en cuant a T y Sr n ba o y a to c nten d de Fe para as tener una referenc a de a nfluenc a de nten do de Cu en e crec m ento de as fases

Se encontró que a esfer c dad de as muestras s d f cadas entamente es menor que a de as muestras s d ficadas en m de metá A ana izar as muestras de ba o y a to conten do de Fe so d ficadas en m des de arena se encontró que as de a to conten do de este e emento presentaban va ores un poc men res a s de as de ba conten d F gura H5

4.5.1.1. Muestras en la condición de vaciado.

La muestras de menor conten d de Cu para todas as cond c nes de vac ado presentan un porcenta e de área menor que as de as m estras de mayor nten do de Cu Fe+ este comportam ento tamb én se presenta en lo referente a área y a ng tud pr med o de a fases F guras 1a c d 4a c d

Con re ac ón a a esfer c dad e comportam ento anter or camb a tota mente a encontrarse que as muestras de menor conten do de Cu Fe- presentan por o genera va ores un poco mayores que os mostrados por as muestras de mayor conten do de Cu F guras 1e - l4e Estos dos comportam entos pueden re ac nárse ya que a aumentar e tamaño de as fases as cua es com enzan a crecer en e qu do remanente durante a so d ficac ón t enen una restr cc ón en sus d recc ones de crec m ento esto es que crecen en os huecos que de an e a um n o pr mano y e eutect co A -S además de as fases ricas en Fe o que hace que adqu eran formas cada vez más comp e as d sm nuyend de esta manera su grado de esfer c dad

Los datos obten dos de a cant dad de part cu as detectadas por campo ana zado mostraron una tendenc a muy s m ar a a esfenc dad F guras 1b 4b est tamb én se podr a asoc ar a a restr cc ón en e crec m ento pr vocada por a s d f ca ón de a mayor parte de meta es dec r que a menor conten do de Cu se requ ere que s d fique mayor cant dad de a um n o para a canzar a compos n eutè t ca hac end que s s t s d nde se acumu a e meta segregado se hagan mas pequeños y se c mun quen un s n otros cada vez menos provocando e aumento de as fases y a d sm nu ón de fases grandes de formas ntr ncadas

4.5.1.2. Efecto de los tratamientos térmicos de solubilizado.

A observar as m croestructuras de as muestras so d f cadas en mo des de arena en a cond c ón de vac ado Apénd ce J y mpararlas c n as m roestructuras de as muestras so ub zado a 460 480 y 5 C Apénd es K L y M respect vamente se comprobó que os camb os m croestructura es encontrad s se m taban a a esfer diza n de as part cu as de S de eutéct co pr nc pa de a a ea n efecto que n se estud ó en e presente trabaj y tamb én se presentaron camb os en a morf og a de as fases r cas en Cu A_2Cu no se observó aumento de a poros dad y a hacer a nspecc n v sua de as p ezas no se encontraron rastros de fus ones parc a es agr meo o que comprueba que a as temperaturas de so ub zado no se presento a fus ón de eutéct mp e de mater a

A ana zar os resu tados de as mágenes bten das de as muestras tratadas térm camente se observó que en ocas ones s resu tad s n s guen a tendenc a óg ca a ser comparados con a muestra en que se ana izó en a nd ón de vac ad es dec r que os resu tados s gan una tendenc a hac a a alza o ha a a ba a depend endo de parámetro m croestructura ana izado Esto se debe a dos factores e pr mero de e s es nherente a mater a que durante su proceso de so d fica ón segrega estas fases r cas en Cu o que provoca var ac ones notab es en a cant dad de fases detectada no bstante a gran cant dad de

campos ana zados en as muestras E segundo factor se debe a que os datos reportados de os parámetros m croestructura es son e promed o de os dat s med dos en as fases encontradas y a so ub ızar as p ezas as part cu as fases más pequeñas t enden a desaparecer o que hace que os promed os camb en notab emente

En as gráf cas mostradas en as F guras I1a- 4a e I5 de Apénd ce I se observa c aramente a tendenc a a a ba a que s gue e porcenta e de área detectado obten éndose va ores fina es de entre 0 123 y 0 679 s endo en promed o os va ores más bajos para as muestras de menor conten do de Cu Fe

Los datos obten dos de a cant dad de part cu as detectadas por campo ana ızado para as muestras somet das a os tratam ent s térm c s de so ub zado mostraron una c ara tendenc a a la ba a F guras I1b 4b e 6 s endo esto resu tado de a desapanc ón de as part cu as pequeñas provocada por a d fus ón de Cu hac a a matrız de a um n o pr mano En estas muestras tamb én se observa a gua que en as muestras s n tratam e^to térm co que as muestras de mayor conten do de Cu Fe+ presentaban va res menores que os de as muestras con menor conten do Fe

En o referente a área y a ong tud promed de a fases F guras I1c d 4c d y 7 I8 se observan gera tendenc as a a a za o que se puede exp car en base a a d u ón de as part cu as más pequeñas por o que e promed o de área y a ng tud de as fases aumenta de manera s gn f cat va aunque a desapare er as fases mas pequeñas as grandes y med anas tamb én d sm nuyes su tamaño o que provoca que so o haya un gero aumento en os va ores obten dos para estas var ab es En estos resu tad s se bserva que as muestras tratadas térm camente de menor conten d de Cu Fe tamb én s guen a tenden a bservada en las muestras que permanec an en a cond ón de va ad esto es va res menores que os reportados por as muestras con mayor conten d de Cu Fe+

La esfer dad t ende a aumentar n e tratam ent térm co este resu tado ya era esperado Cu F guras 1e 4e 9 deb d a a d fı s n de Cu y a fragmenta ón de as fases Esta var ab e s gu ó a m sma tendenc a que a cant dad de part u as detectadas

4.5.2. Muestras con altas velocidades de solidificación.

En a Tab a 4 9 se muestran s resu tados bten d s de aná s s de magen de as ocho compos ones qu m cas de as muestras s d ficadas ráp damente en m de metá co est s va ores tamb én sé graf caron en e Apénd e H para as muestras que permanec an en a

cond c ón de vac ado s n tratam ento térm co de so ub ızado separándose os datos de acuerdo a su cond c ón de vac ado y su compos c ón qu m ca

La cant dad de part cu as detectadas por campo se muestran graficadas en a F gura H2 donde se observa una tendenc a más c ara que a observada en as muestras so d ficadas en mo des de arena Esta tendenc a a a d sm nuc ón de a cant dad de fases conforme e baño metá co es tratado meta urg camente pasando de meta b anco a meta mod ficado o refinado y f na mente meta mod f cado y refinado da como resu tado d sm nuc ones desde 67 96 hasta 37 2 para as muestras de ba o conten do de Fe y desde 61 18 hasta 26 26 para as muestras de a to conten do de Fe mostrand esto que e tratam ento meta urg co de baño metá co t ende a d sm nu r a cant dad de fases de a to conten d de Cu prec p tadas durante a so d ficac ón

En estas muestras se presentar n estructuras más pequeñas que en as muestras s d f cadas entamente e área pr med o de as fases se en uentra entre ∠ y ⁴0 μm^2 y su ong tud promed o es de 2 5 a 6 μm Tab a 4 9 Otro punto a observar en a gráfi a de estos datos en as F guras H3 y H4 es a gera tendenc a re ente que s guen s va ores a pasar de meta b anco a muestras con tratam entos meta urg os en a baño de meta qu do de m d f cac ón o ref nam ento S endo e anter r comportam ento c ntrar o a mostrado por a cant dad de part cu as detectadas por campo F gura H2 manten endo as muestras de esta manera un área detectada constante y s m ar a a de as muestras s d f cadas en mo des de arena

En o referente a a d ferenc a que ex ste en área y ong tud de as fases de a to conten do de Cu prec p tadas en as muestras s d ficadas en mo de metá co de ba o y a to conten do de Fe se presenta un c mp rtam ento cruzado F guras H3 y H4 esto es que as muestras mod f cadas y de ba onten do de Fe presentar n va res geramente mayores que as de a to conten do de Fe y as muestras ref nadas de ba onten d de Fe presentar n una d sm nuc ón en e área con respecto a sus s m ares de a t c nten do de Fe de entre e 51 8 y 58 1 y en a ong tud de entre 31 5 y 36 9 s end este mp rtam ent d ferente a mostrado por as muestras so d f cadas en mo des de arena

La esfer c dad de as fases de r cas en Cu en as muestras con a t conten do de Fe t ende a ser menor que en as muestras de ba o conten d de Fe pud énd se exp car esto por e aumento en e área y a ong tud de as fases a aumentar e nten do de Cu en as muestras on a to conten do de Fe F guras H5

Prueba	Tratamiento térmico	C nd ciones	Area detectada	Fases promedio detectadas por campo	Area promed de las fases μm^2	L ngitud promedio de las fases (μm	Esfericidad
1	nd Vac	Fe T Sr	1 172	67 96	2 62	2 81	0 715
1	So 460 C	Fe T Sr	0 355	11 88	4 54	3 46	0 749
1	S 48 C	Fe T Sr	088	1 86	7 26	4 33	0 737
1	So 500 C	Fe T Sr	0 0013	02	9 92	7 77	0 408
2	Cond Vac	Fe T Sr +	1 280	44 04	4 41	3 60	0 701
2	So 460 C	Fe T Sr +	0 394	8 36	7 16	4 34	0 775
2	So 480 C	Fe T Sr +	0 083	1 22	10 36	4 70	0 808
2	So 500 C	Fe T Sr +	0 012	0 14	13 28	5 27	0 913
3	Cond Vac	Fe T + Sr	1 56	43 56	3 68	32	0 708
3	S 460	Fe T + S	0 19	6 3	7 70	4 64	0 749
3	S 48	Fe T + Sr	11	2 12	7 89	4 11	0 783
3	S 5	Fe T + Sr	0				0
4	C nd Vac	Fe T + Sr +	999	7 2	4 7	3 56	0 692
4	S 460 C	Fe T + Sr +	23	5 54	6 40	4	767
4	S 480 C	Fe T + Sr +	52	74	10 82	5 7	0 731
4	So 5 C	Fe T + Sr +		0			
5	C nd Vac	Fe + T Sr	1 27	61 18	2 55	2 72	0 742
5	S 460	Fe + T Sr	71	13 28	4 25	3 16	8 3
5	S 48 C	Fe + T Sr	51	1 6	4 93	3 35	808
5	S 5 0 C	Fe + T Sr				0	0
6	nd Va	Fe + T Sr +	' 04	48 98	73	3 48	0 676
6	S 460 C	Fe + T Sr +	4 8	8 2	7 57	4 57	0 739
6	S 480	Fe + T Sr +	0 116	3 06	5 78	52	799
6	S 5 C	Fe + T Sr +				0	
7	nd Va	Fe + T + Sr	1 661	3 04	7 63	4 84	0 645
7	S 460 C	Fe + T + S	284	7 22	5 99	89	0 780
7	S 48	Fe + T + Sr	85	1 56	8 34	4 2	0 855
7	S 5 C	Fe + T + Sr					0
8	nd Va	Fe + T + r +	1 679	26 26	9 71	5 64	0 616
8	S 460	Fe + T + r +	419	9	7 7	4 12	0 775
8	S 48	Fe + T + Sr +	0 38	1 22	4 75	3 14	882
8	So 500	Fe + T + Sr +	0	0		0	0

Tabla 4.9. Aná s s de magen de as fases de a to conten do de Cu segregadas durante a so d ficac ón en as muestras so d f cadas en m des metá cos

4.5.2.1. Muestras en la condición de vaciado.

En as muestras de a tas ve oc dades de so d ficación se presentan dos comportam entos d st ntos en o referente a os resu tados obten dos para e porcentaje de area detectada por campo e área y a ong tud promed o de as part cu as E pr mer comportamiento se presenta en as muestras de a to conten do de T y es s m ar a mostrado por a tota dad de as muestras so d f cadas en mo des de arena esto es que as muestras de menor conten do de Cu Fe- presentan va ores menores que as de as muestras con mayor conten do de Cu F guras I12a c d y I13a c d E segundo comportam ento o presentan as muestras de bajo contenido de T en estas muestras os va ores obten dos para os parámetros microestructura es antes ana zados son cas gua es o con un gero dom n o de as muestras de bajo conten do de Cu F guras I10a c d y 11a c d

La esfer c dad presenta va ores muy s m ares para as muestras de menor y mayor conten do de Cu Fe y Fe+ con bajo conten do de T F guras I10e y I11e) m entras que las de a to conten do de este e emento muestran un comportam ento muy s m ar a presentado por sus s m ares de ba as ve oc dades de so d f cac ón esto es que as muestras de menor contenido de Cu Fe presentan por genera va res un poc mayores que os m strados por as muestras de mayor conten do de Cu F guras 12e y I13e

Los datos obten dos en re ac ón a a cant dad de part cu as detectadas por campo ana zado mostraron un comportam ento muy s m ar a presentado por sus s m ares de bajas ve oc dades de so d f cac ón esto es que as muestras de menor conten do de Cu Fe) presentan por lo genera va ores un poco mayores que s mostrad s p r as muestras de mayor conten do de Cu F guras I10b 12b y I13b as un cas muestras que no presentaron este comportam ento fueron as de a to conten d de Sr F gura I11b

4.5.2.2. Efecto de los tratamientos térmicos de solubilizado.

En as muestras so d f cadas en mo de metá co tratadas térm camente Apénd ces K L y M tampoco se observaron rastros de fus ones par a es o que c mprueba que a las temperaturas de so ub ización usadas son confiab es s se ogra tener un contro estricto de a temperatura

A ana izar os va ores bten dos en as muestras tratadas térm camente s d f cadas en mo de metá co se observó que presentaban tenden as más c a as que de as muestras so d f cadas entamente o que hace de pronto confusas as gráficas es a desapar c ón tota de as fases r cas en Cu A_2Cu durante os tratam entos de so ub izadó a 500 C

E porcentaje de área detectada y a cant dad de part cu as detectadas por campo se gráf ca en as F guras I10a y b- 13a y b I14 e I15 Apénd ce I y muestra c aramente la tendenc a a a baja hasta egar práct camente a cero en a mayor a de as pruebas durante e so ub zado a 500 C En estas muestras cas no se presenta d ferenc a a comparar las muestras de menor y mayor conten do de Cu

En o referente a área y a ong tud promedio de a fases F guras I10c d – I13c d y I16–I17 se observan dos tendenc a la primera es a a a za o que se debe a a desaparición de la mayor parte de as part cu as quedando só o unas cuantas de gran tamaño o que hace que el promed o suba drást camente el segundo comportam ento es a a baja y se debe a la desapar c ón tota de as fases o que hace que e promed o sea cero

La esfer c dad t ende a aumentar hasta temperaturas de so ub zado de 480 C en las muestras so ubı zadas a 500 C se presentan os m smos comportam entos descr tos en el párrafo anter or F guras I10e–I13e I18